

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LUIZ GUILHERME COSTA CAMPOS

UMA METODOLOGIA PARA ENSAIO E SIMULAÇÃO DOS FENÔMENOS DE TRANSPORTE
DE DETERGENTE EM LAVADORAS DOMÉSTICAS DE EIXO VERTICAL

CURITIBA

2015

LUIZ GUILHERME COSTA CAMPOS

UMA METODOLOGIA PARA ENSAIO E SIMULAÇÃO DOS FENÔMENOS DE TRANSPORTE
DE DETERGENTE EM LAVADORAS DOMÉSTICAS DE EIXO VERTICAL

Dissertação aprovada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica do Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Paraná, na área de concentração Fenômenos de Transporte e Mecânica dos Sólidos.

Orientador: Prof. Dr. Christian Johann Losso Hermes

CURITIBA

2015

C198m

Campos, Luiz Guilherme Costa

Uma metodologia para ensaio e simulação dos fenômenos de transporte de detergente em lavadoras domésticas de eixo vertical/ Luiz Guilherme Costa Campos. — Curitiba, 2015.
150 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, 2015.

Orientador: Christian Johann Losso Hermes .

Bibliografia: p. 113-117.

1. Massa - Transferência. 2. Detergentes. 3. Máquinas de lavar. I. Universidade Federal do Paraná. II. Hermes, Christian Johann Losso. III. Título.

CDD: 530.475

TERMO DE APROVAÇÃO

LUIZ GUILHERME COSTA CAMPOS

UMA METODOLOGIA PARA ENSAIO E SIMULAÇÃO DOS FENÔMENOS DE TRANSPORTE DE DETERGENTE EM LAVADORAS DE EIXO VERTICAL

Dissertação aprovada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica do Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Paraná, na área de concentração Fenômenos de Transporte e Mecânica dos Sólidos.

Banca Examinadora:



Prof^a. Dr^a. Cláudia Eliana Bruno Marino
UFPR



Prof. Dr. Rodrigo Perito Cardoso
UFPR



Prof. Dr. Waldyr de Lima e Silva Junior
UFPR

Curitiba, 31 de julho de 2015.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por ter me concedido tantas oportunidades.

Sou muito grato ao orientador Professor Christian Hermes pelos conselhos, direcionamentos e paciência em transmitir seus conhecimentos.

Agradeço à empresa que trabalho pelo incentivo e suporte recebido. Desejo citar o nome de algumas das pessoas envolvidas neste trabalho cuja cooperação foi fundamental para a execução deste trabalho: César Fabiano Silva, Cirilo Cavalli, Eduardo Palmeira, Felipe Scheer, Gabriel Sabóia, João Carlos Nascimento, Luiza Gonzatto, Rafael Simões, Renata Souza e Ricardo Peng.

O incentivo e compreensão da minha família e grandes amigos foi de fundamental importância durante todo o desenvolvimento da pesquisa, em especial: Cleide Maria, Luiz Fernando, Maria Fernanda e Maria Luiza Campos, Samanta Smoger e Daniela Wollmann.

Aos colegas do Laboratório de Termodinâmica e Termofísica da UFPR pelas contribuições.

A todos que estiveram presentes em todo esse processo e que ajudaram de alguma forma no desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

O transporte de detergente entre compartimentos e através do tecido durante o processo de lavagem em lavadoras domésticas de carregamento superior (eixo vertical) são estudados no presente trabalho. Uma metodologia experimental foi desenvolvida com o intuito de observar a variação temporal da concentração de detergente em cada compartimento como também numa sonda que simula uma peça real de tecido. Realizou-se um experimento fatorial completo o qual evidenciou que o local de inserção do detergente assim como a velocidade de agitação são os fatores determinantes do processo. Criou-se um modelo transiente global para simular o transporte advectivo-difusivo do detergente. As equações diferenciais ordinárias foram resolvidas numericamente utilizando um algoritmo de incremento de tempo adaptativo. Os parâmetros de fechamento adotados no modelo foram obtidos através dos dados experimentais, o que evidencia o caráter semi-empírico do modelo. As previsões do modelo para a variação temporal da concentração de detergente e os dados experimentais tiveram concordância dentro de uma faixa de incerteza de medição ($\sim 15\%$) para a maior parte dos casos vistos.

Palavras-chave: Transferência de massa. Análise experimental. Simulação transiente. Transporte de detergente. Lavadora de roupa.

ABSTRACT

The detergent transport between the compartments and through the garments during the washing process in household top-load washing machines is investigated. An experimental methodology was put forward for evaluating the time evolution of the detergent concentration in each compartment, and also in a probe enveloped by a cotton-linen that emulates the garments. The experiments were carried out following a full factorial experiment, pointing out the detergent insertion location and the agitation speed as the rate-determining factors. A lumped transient model was advanced for the advective-diffusive transport of detergent. The set of ODEs was solved numerically through an adaptive time-step algorithm. The closing parameters required by the model were reduced from the experimental data, thus providing the model with a semi-empirical character. The model predictions for the time evolution of the detergent concentration and the experimental data agreed to within the range of the measurement uncertainties (~15%) for the cases majority.

Keywords: Mass transfer. Experimental analysis. Transient simulation. Detergent transport. Washing machine.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ilustração <i>Das große Waschfestvor der Stadt</i> de Solis (1531).....	21
Figura 2 – Desenho esquemático da máquina de lavar proposta por Jacob Schaeffer (1766).....	22
Figura 3 – Thor, uma das primeiras máquinas de lavar produzidas em larga escala com motor elétrico – modelo de 1911 (Maxwell, 2009).....	23
Figura 4 – Esquemático de uma máquina de eixo vertical (adaptado de Hesbenefitingpeople, 2014).	23
Figura 5 – Esquemático de uma máquina de eixo horizontal (LG, 2015).	24
Figura 6 – Tira de sujeiras padronizadas para teste de eficiência de lavagem (IEC, 2010).	26
Figura 7 – Surfactante e sua emulsão de uma gotícula de óleo (adaptado de Sciencelearn, 2012).	27
Figura 8 – Fatores que influenciam o processo de limpeza de uma superfície (adaptado de von Rybinski, 2007).....	27
Figura 9 – Representação esquemática de um volume de controle com escoamento com velocidade u na direção x	34
Figura 10 – Representação esquemática em corte transversal de uma máquina de lavar de eixo vertical evidenciando os locais de mistura.	38
Figura 11 – Modelo de reatores e tanques em série (van den Brekel, 1987).....	39
Figura 12 – Modelo simplificado utilizado no atual estudo.	40
Figura 13 – Vazões volumétricas que atuam no volume de controle do tanque.....	40
Figura 14 – Vazões volumétricas que atuam no volume morto.	41
Figura 15 – Vazões volumétricas que atuam no volume de controle do cesto.	42
Figura 16 – Vazões volumétricas que atuam no volume de controle dos outros tecidos que não a sonda.....	43
Figura 17 – Vazões volumétricas e difusividade efetiva que atuam no volume de controle da sonda.....	44
Figura 18 – Representação esquemática da primeira camada da sonda.	44
Figura 19 – Representação esquemática de uma camada intermediária da sonda.	45
Figura 20 – Representação esquemática da camada do meio da sonda.....	45
Figura 21 – Fluxograma representativo do algoritmo utilizado.	47
Figura 22 – Vista do interior da lavadora utilizada nos testes da metodologia (Fonte: Simpson, 2015).....	49
Figura 23 – Representação esquemática do funcionamento de um condutivímetro (Fonte: adaptado de Mettler Toledo, 2015).	50
Figura 24 – Representação esquemática do funcionamento de um espectrofotômetro UV (Fonte: adaptado de Sousa, 2011).....	51
Figura 25 – Relação entre condutividade, absorbância e concentração (água com dureza controlada).	52
Figura 26 – Relação entre condutividade, absorbância e concentração (água destilada).	53

Figura 27 – Alturas de coletas para testes da metodologia experimental.....	54
Figura 28 – Instrumentação do cesto da lavadora.....	55
Figura 29 – Instrumentação do tanque da lavadora.	55
Figura 30 – Instrumentação do agitador.	56
Figura 31 – Conjunto dos compartimentos da lavadora.....	56
Figura 32 – Sonda de tecido grande (dobrado duas vezes) com duto no interior.	57
Figura 33 – Sonda de tecido pequena (dobrado quatro vezes) com duto no interior.	58
Figura 34 – Influência da decantação e homogeneização nas leituras das amostras coletadas para a concentração de 0,5 g/L para água de dureza e temperatura controladas.....	60
Figura 35 – Variação da condutividade no tanque para condição A.....	62
Figura 36 – Variação da condutividade no cesto para condição B.	63
Figura 37 – Variação da condutividade no tanque para condição C.	63
Figura 38 – Variação da condutividade no tanque e cesto para condição D.....	64
Figura 39 – Variação da condutividade no cesto e tanque para configuração A da segunda série.....	65
Figura 40 – Comparativo entre respostas do tanque e cesto da segunda e terceira séries.	65
Figura 41 – Variação da condutividade para a configuração I.	67
Figura 42 – Comparativo das respostas de condutividade e absorbância da sonda pequena.	68
Figura 43 – Cesto da lavadora logo após a inserção do detergente (sem agitação).	69
Figura 44 – Cesto da lavadora após 9 horas da inserção do detergente (sem agitação).	69
Figura 45 – Variação da condutividade para condição sem agitação e sem tecidos: coletas realizadas no cesto.	70
Figura 46 – Variação da condutividade para condição sem agitação e com tecidos: coletas realizadas no cesto.	71
Figura 47 – Agitador com estrutura montável utilizado nos experimentos fatoriais.....	74
Figura 48 – Altura da mangueira utilizada nos testes do experimento fatorial.	75
Figura 49 – RCP ou <i>Rapid Control Prototype</i> : bancada usada nos experimentos fatoriais.	77
Figura 50 – Variação da concentração de detergente no tanque e no cesto na condição 3 do experimento fatorial.....	81
Figura 51 – Variação da concentração de detergente no tanque e no cesto na condição 4 do experimento fatorial.....	81
Figura 52 – Variação da concentração de detergente na sonda na condição 9 do experimento fatorial.....	82
Figura 53 – Variação da concentração para a configuração 3 do experimento fatorial....	83
Figura 54 – Variação da concentração para a configuração 1 do experimento fatorial....	83
Figura 55 – Variação da concentração para a configuração 6 do experimento fatorial....	84
Figura 56 – Variação da concentração para a configuração 5 do experimento fatorial....	85
Figura 57 – Análise de sensibilidade do tempo de equilíbrio entre tanque e cesto do experimento fatorial.....	87
Figura 58 – Análise de sensibilidade da diferença relativa entre a concentração da sonda e a concentração média do tanque e cesto em 30 minutos do experimento fatorial.....	88

Figura 59 – Fundo do tanque após configuração 10 com resquícios brancos de detergente (inserção no cesto).....	90
Figura 60 – Fundo do tanque após configuração 13 com resquícios brancos de detergente (inserção no tanque).	90
Figura 61 – Comparativo modelo numérico com dados experimentais para o teste 7 do experimento fatorial.....	91
Figura 62 – Comparativo modelo numérico com dados experimentais para o teste 11 do experimento fatorial.....	92
Figura 63 – Comparativo modelo numérico com dados experimentais para o teste 8 do experimento fatorial.....	93
Figura 64 – Comparativo modelo numérico com dados experimentais para o teste 4 do experimento fatorial.....	94
Figura 65 – Comparativo modelo numérico com dados experimentais para o teste 6 do experimento fatorial.....	94
Figura 66 – Análise de sensibilidade da vazão entre tanque e cesto em relação aos fatores do experimento realizado.	95
Figura 67 – Análise de sensibilidade da vazão entre cesto e meio da sonda em relação aos fatores do experimento realizado.	96
Figura 68 – Análise de sensibilidade da difusividade efetiva em relação aos fatores do experimento realizado.....	96
Figura 69 – Análise de sensibilidade do percentual da massa inserida no volume morto em relação aos fatores do experimento realizado.....	97
Figura 70 – Análise de sensibilidade da vazão ente tanque e volume morto em relação aos fatores do experimento realizado.	97
Figura 71 – Variação da concentração de detergente no cesto alterando apenas a vazão entre tanque e cesto (\dot{V}_{T-C}).....	98
Figura 72 – Variação da concentração de detergente na sonda alterando apenas a vazão entre cesto e meio da sonda (\dot{V}_{C-N}).	99
Figura 73 – Variação da concentração de detergente no cesto alterando apenas a vazão entre tanque e volume morto (\dot{V}_{T-VM}).....	100
Figura 74 – Variação da concentração de detergente no tanque para duas condições com inserção no tanque, mas com diferentes níveis de agitação.	101
Figura 75 – Variação da concentração de detergente no cesto para duas condições com inserção no cesto, mas com diferentes níveis de agitação.....	101
Figura 76 – Variação da concentração de detergente na sonda para duas condições com inserção no tanque, mas com diferentes níveis de agitação.	102
Figura 77 – Variação da concentração de detergente no cesto para duas condições com mesmo nível de agitação, mas com inserção em locais distintos.....	103
Figura 78 – Variação da concentração de detergente na sonda para duas condições com mesmo nível de agitação, mas com inserção em locais distintos.....	103
Figura 79 – Variação da concentração na sonda ao se alterar a velocidade de agitação com inserção de detergente no tanque (obtida através do modelo numérico).	105
Figura 80 – Variação da concentração na sonda e no cesto ao se alterar o local de inserção de detergente (obtidas através do modelo numérico).	105
Figura 81 – Representação esquemática da primeira camada da sonda.	116
Figura 82 – Representação esquemática de uma camada intermediária da sonda.....	118

Figura 83 – Representação esquemática da camada do meio da sonda.....	118
Figura 84 – Variação da concentração de detergente na sonda na condição máxima em 3 repetições realizadas.....	122
Figura 85 – Dados do experimento fatorial: ensaio 1.....	124
Figura 86 – Dados do experimento fatorial: ensaio 2.....	124
Figura 87 – Dados do experimento fatorial: ensaio 3.....	125
Figura 88 – Dados do experimento fatorial: ensaio 4.....	125
Figura 89 – Dados do experimento fatorial: ensaio 5.....	126
Figura 90 – Dados do experimento fatorial: ensaio 6.....	126
Figura 91 – Dados do experimento fatorial: ensaio 7.....	127
Figura 92 – Dados do experimento fatorial: ensaio 8.....	127
Figura 93 – Dados do experimento fatorial: ensaio 9.....	128
Figura 94 – Dados do experimento fatorial: ensaio 10.....	128
Figura 95 – Dados do experimento fatorial: ensaio 11.....	129
Figura 96 – Dados do experimento fatorial: ensaio 12.....	129
Figura 97 – Dados do experimento fatorial: ensaio 13.....	130
Figura 98 – Dados do experimento fatorial: ensaio 14.....	130
Figura 99 – Dados do experimento fatorial: ensaio 15.....	131
Figura 100 – Dados do experimento fatorial: ensaio 16.....	131
Figura 101 – Análise de sensibilidade do tempo de equilíbrio entre tanque e cesto do experimento fatorial.....	132
Figura 102 – Análise de sensibilidade da relação entre a concentração inserida e concentração média do tanque e cesto em 6 minutos.....	132
Figura 103 – Análise de sensibilidade da relação entre a concentração inserida e concentração média do tanque e cesto em 16 minutos.....	133
Figura 104 – Análise de sensibilidade da relação entre a concentração inserida e concentração média do tanque e cesto em 30 minutos.....	133
Figura 105 – Análise de sensibilidade do inverso do tempo no qual o tanque e cesto atingem a concentração inserida.....	134
Figura 106 – Análise de sensibilidade do percentual da concentração inserida presente na sonda em 6 minutos.....	134
Figura 107 – Análise de sensibilidade do percentual da concentração inserida presente na sonda em 16 minutos.....	135
Figura 108 – Análise de sensibilidade do percentual da concentração inserida presente na sonda em 30 minutos.....	135
Figura 109 – Análise de sensibilidade da diferença relativa entre a concentração da sonda e a concentração média do tanque e cesto em 30 minutos do experimento.....	136
Figura 110 – ANOVA do tempo de equilíbrio entre tanque e cesto do experimento fatorial.....	136
Figura 111 – ANOVA da relação entre a concentração inserida e concentração média do tanque e cesto em 6 minutos.....	137
Figura 112 – ANOVA da relação entre a concentração inserida e concentração média do tanque e cesto em 16 minutos.....	137
Figura 113 – ANOVA da relação entre a concentração inserida e concentração média do tanque e cesto em 30 minutos.....	137

Figura 114 – ANOVA do inverso do tempo no qual o tanque e cesto atingem a concentração inserida.....	137
Figura 115 – ANOVA do percentual da concentração inserida presente na sonda em 6 minutos.....	138
Figura 116 – ANOVA do percentual da concentração inserida presente na sonda em 16 minutos.....	138
Figura 117 – ANOVA do percentual da concentração inserida presente na sonda em 30 minutos.....	138
Figura 118 – ANOVA da diferença relativa entre a concentração da sonda e a concentração média do tanque e cesto em 30 minutos do experimento.....	138
Figura 119 – Distribuição F de Snedecor (Fonte: Lira, 2013)	139
Figura 120 – Comparativo entre dados experimentais e numéricos: ensaio 1 do experimento fatorial.....	140
Figura 121 – Comparativo entre dados experimentais e numéricos: ensaio 2 do experimento fatorial.....	140
Figura 122 – Comparativo entre dados experimentais e numéricos: ensaio 3 do experimento fatorial.....	141
Figura 123 – Comparativo entre dados experimentais e numéricos: ensaio 4 do experimento fatorial.....	141
Figura 124 – Comparativo entre dados experimentais e numéricos: ensaio 5 do experimento fatorial.....	142
Figura 125 – Comparativo entre dados experimentais e numéricos: ensaio 6 do experimento fatorial.....	142
Figura 126 – Comparativo entre dados experimentais e numéricos: ensaio 7 do experimento fatorial.....	143
Figura 127 – Comparativo entre dados experimentais e numéricos: ensaio 8 do experimento fatorial.....	143
Figura 128 – Comparativo entre dados experimentais e numéricos: ensaio 9 do experimento fatorial.....	144
Figura 129 – Comparativo entre dados experimentais e numéricos: ensaio 10 do experimento fatorial.....	144
Figura 130 – Comparativo entre dados experimentais e numéricos: ensaio 11 do experimento fatorial.....	145
Figura 131 – Comparativo entre dados experimentais e numéricos: ensaio 12 do experimento fatorial.....	145
Figura 132 – Comparativo entre dados experimentais e numéricos: ensaio 13 do experimento fatorial.....	146
Figura 133 – Comparativo entre dados experimentais e numéricos: ensaio 14 do experimento fatorial.....	146
Figura 134 – Comparativo entre dados experimentais e numéricos: ensaio 15 do experimento fatorial.....	147
Figura 135 – Comparativo entre dados experimentais e numéricos: ensaio 16 do experimento fatorial.....	147

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Equações de fechamento dos volumes de controle estudados.	48
Tabela 2 – Fatores e níveis utilizados no experimento fatorial.	72
Tabela 3 – Plano de testes do experimento fatorial.	73
Tabela 4 – Resumo da análise da variância do experimento fatorial.	89
Tabela 5 – Resumo da análise da variância dos parâmetros do modelo numérico em relação aos fatores do experimento.	97
Tabela 6 – Coeficientes das funções transferência adotadas no experimento fatorial...	120
Tabela 7 – Variações percentuais da concentração entre três repetições para a condição máxima.....	123
Tabela 8 – Valores dos parâmetros empíricos para cada configuração testada.	148

SÍMBOLOS

SÍMBOLOS ROMANOS

Símbolo	Descrição	Unidade
a	Comprimento de onda	$[m]$
Abs	Absorbância	$[-]$
C	Concentração	$[kg.m^{-3}]$
D	Difusividade	$[m^2.s^{-1}]$
D_{ef}	Difusividade efetiva	$[m^2.s^{-1}]$
Fo	Número de Fourier	$[-]$
h	Incremento	$[-]$
J	Fluxo mássico	$[kg.m^{-2}.s^{-1}]$
l	Espessura	$[m]$
L	Comprimento	$[m]$
M	Massa	$[kg]$
\dot{M}	Vazão mássica	$[kg.s^{-1}]$
Pe	Número de Péclet	$[-]$
Q	Vazão volumétrica	$[m^3.s^{-1}]$
q	Fluxo difusivo	$[kg.m^{-2}.s^{-1}]$
t	Tempo	$[s]$
u	Velocidade	$[m.s^{-1}]$
u^*	Velocidade adimensional na direção x	$[-]$

V	Volume	$[m^3]$
\dot{V}	Vazão volumétrica	$[m^3 \cdot s^{-1}]$
v^*	Velocidade adimensional na direção y	$[-]$
X	Razão de massa	$[-]$
x^*	Coordenada adimensional na direção x	$[-]$
w^*	Velocidade adimensional na direção z	$[-]$
y^*	Coordenada adimensional na direção y	$[-]$
z^*	Coordenada adimensional na direção z	$[-]$

SÍMBOLOS GREGOS

Símbolo	Descrição	Unidade
α	Razão de vazão	$[-]$
ε	Porosidade	$[-]$
λ	Coeficiente	$[-]$
τ	Tortuosidade	$[-]$

ÍNDICES

Símbolo	Descrição
C	Cesto
N	Meio da sonda
O	Outros tecidos
s	Superfície

S	Sonda
T	Tanque
VM	Volume morto

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	20
1.1 Contexto	20
1.2 Literatura.....	27
1.3 Objetivos e metodologia	32
1.4 Estrutura do documento.....	33
2 MODELAGEM MATEMÁTICA	34
2.1 Modelo físico	34
2.1.1 Transferência de massa	34
2.1.2 Adimensionalização da equação governante	36
2.1.3 Transferência de detergente em uma lavadora de eixo vertical.....	37
2.1.4 Modelo físico aplicado a uma lavadora de eixo vertical.....	39
2.1.4.1 Balanço de massa no tanque.....	40
2.1.4.2 Balanço de massa no volume morto	41
2.1.4.3 Balanço de massa no cesto	42
2.1.4.4 Balanço de massa nos tecidos	43
2.1.4.5 Balanço de massa na sonda.....	43
2.2 Esquema numérico	45
2.2.1 Método de solução	45
2.2.2 Algoritmo.....	46
2.2.3 Equações de fechamento	48
3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	49
3.1 Medição da concentração.....	50
3.1.1 Condutividade.....	50
3.1.2 Absorbância.....	50
3.2 Avaliação da medição indireta da concentração	51
3.3 Pontos de coleta das amostras	54
3.4 Intervalo de coleta	58
3.5 Efeito da decantação e homogeneização.....	59
3.6 Testes envolvendo água e detergente na lavadora	60
3.6.1 Primeira série	61
3.6.2 Segunda série.....	64

3.6.3	Terceira série	65
3.7	Testes com água, detergente e tecidos na lavadora.....	66
3.8	Testes com água e detergente sem agitação	68
3.9	Experimento fatorial	71
3.9.1	Condições para a realização dos testes.....	74
3.9.2	Sequência adotada no experimento fatorial	75
3.9.3	Bancada de testes utilizada no experimento fatorial	77
3.9.4	Repetições	77
3.10	Síntese da metodologia experimental.....	78
4	RESULTADOS.....	80
4.1	Resultados do experimento fatorial.....	80
4.1.1	Análise da sensibilidade do experimento fatorial	85
4.1.2	Informação complementar sobre o experimento fatorial	89
4.2	Calibração e validação do modelo computacional.....	91
4.2.1	Análise de sensibilidade dos parâmetros de ajuste	94
4.2.2	Influência dos parâmetros empíricos na variação de concentração de detergente 98	
4.2.3	Considerações sobre a análise de sensibilidade do experimento fatorial relacionadas com parâmetros empíricos do modelo numérico	100
4.2.4	Adaptação do modelo computacional para a previsão de diferentes combinações das variáveis de entrada do experimento fatorial.....	104
5	CONCLUSÕES	106
5.1	Conclusões finais	106
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	108
	REFERÊNCIAS.....	111
	APÊNDICE I – DEDUÇÕES DAS EQUAÇÕES GOVERNANTES DA SONDA.....	116
	APÊNDICE II – FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA	120
	APÊNDICE III – MODELOS DOS INSTRUMENTOS UTILIZADOS	121
	APÊNDICE IV – ANÁLISE DAS INCERTEZAS	122
	APÊNDICE V – RESULTADOS DO EXPERIMENTO FATORIAL.....	124
	APÊNDICE VI – RESULTADOS DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO EXPERIMENTO FATORIAL.....	132
	APÊNDICE VII – DISTRIBUIÇÃO F DE SNEDECOR.....	139
	APÊNDICE VIII – COMPARATIVOS ENTRE DADOS EXPERIMENTAIS E MODELO NUMÉRICO.....	140

APÊNDICE IX – PARÂMETROS DE AJUSTE DO MODELO PARA CADA CONFIGURAÇÃO DO EXPERIMENTO FATORIAL	148
--	------------

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO

Desde a antiguidade, a humanidade percebeu a necessidade da limpeza das vestimentas para evitar doenças. Os habitantes das cavernas utilizavam a água dos rios e córregos para a lavação. Até então, a limpeza era efetuada sem a utilização de saponáceos. A remoção da sujeira ocorria pela ação mecânica da batida das vestes em pedras. Com os avanços tecnológicos da sociedade, o processo de lavagem também evoluiu. Na época da Roma Antiga, passaram a existir lavanderias públicas que disponibilizavam sabões, assim como trabalhadores dedicados a esta atividade. Para lavar as roupas, já feitas de tecidos (linho, algodão, lã), não era mais necessário ir até a beira dos rios. Havia aquedutos que transportavam a água até as cidades (Stalmans, 2008).

Avançando na história, a Idade Média (séculos V a XV) trouxe um retrocesso na questão do cuidado com a higiene e, conseqüentemente, com as roupas. Estas eram lavadas poucas vezes no ano, pois existia um receio de que a água trouxesse doenças (de Bonneville, 1998). Apesar disso, o uso de sabão foi intensificado e alguns centros de produção surgiram na Europa, tais como Marselha, Veneza e Gênova, influenciados pelo contato com os povos árabes. O processo de remoção de sujeira, segundo Stalmans (2008), era feito por ação mecânica através de tábuas que eram batidas nas roupas como mostra a Figura 1 ou também através do atrito com pedras no leito dos rios.

Durante a Renascença (séculos XV a XVII), o processo de lavagem de roupas foi aprimorado. De acordo com Stalmans (2008), o processo era demorado, constituído de molho, fervura, ação mecânica (batidas), enxágue e secagem. A invenção de tábuas de madeira para esfregar roupas auxiliou o processo de lavagem. Assim, a indústria de saponáceo sofreu grande expansão, principalmente na cidade de Marselha, situada no sul da França.



Figura 1 – Ilustração *Das große Waschfest vor der Stadt de Solis* (1531).

No século XVIII foi descoberta a clorina pelo químico Karl Scheele e, mais tarde, outros cientistas perceberam que esse elemento era um alvejante e desinfetante. Naquele século, novos processos químicos foram desenvolvidos, tal como a obtenção, a baixo custo, da soda cáustica. Ainda no século XVIII, o cientista francês Louis Pasteur publicou a teoria germinal – as doenças infecciosas são causadas por germes – e inseriu os desinfetantes como essenciais na preservação da saúde. Com essa alteração nos costumes da sociedade e com a revolução científica e tecnológica, as primeiras máquinas de lavar surgiram e modificaram o processo de lavagem.

A primeira máquina de lavar foi inventada por Jacob Schaeffer em 1766. Esta era feita de madeira e composta por um agitador de 4 pás operado manualmente, conforme mostrado na Figura 2.

Em 1851, o americano James King patenteou a primeira máquina de lavar com tambor. Hamilton Smith, sete anos depois, modificou o conceito fazendo com que o tambor fosse rotativo, mas com acionamento manual. Entre as décadas de 1850 e 1870, de acordo com Sérgio *et al.* (2003), cerca de duas mil patentes relacionadas a lavadoras foram publicadas nos Estados Unidos e Inglaterra.



Figura 2 – Desenho esquemático da máquina de lavar proposta por Jacob Schaeffer (1766).

No início do século XX, as primeiras máquinas de lavar com acionamento elétrico foram desenvolvidas. Alva John Fisher foi um dos pioneiros na inserção do motor elétrico na máquina de lavar e patenteou o conceito em 1910. Na Figura 3 é mostrada a Thor, uma das primeiras máquinas de lavar com acionamento elétrico produzida em larga escala. Somente na década de 1920 é que as primeiras máquinas de tambor com eixo horizontal foram lançadas. Durante as décadas seguintes, uma série de melhorias foi introduzida nas máquinas, tais como: aquecimento de água, aplicação automática de produtos de lavanderia (detergente, amaciante, alvejante), centrifugação, entre outros. Para melhor elucidar a diferença entre as configurações de máquina de lavar citadas, de eixo vertical e horizontal, são mostradas, respectivamente, na Figura 4 e na Figura 5, representações esquemáticas de tais tecnologias.

De maneira resumida, uma máquina de lavar de eixo vertical, com carregamento também na vertical, foco do presente estudo, é composta por um cesto onde as roupas são alocadas; um tanque que conecta o cesto com o gabinete através de suspensões; um agitador, responsável pela movimentação e ação mecânica sobre a roupa; um motor elétrico, que aciona o agitador; um sensor de nível, cuja função consiste em controlar a quantidade de água inserida pelas válvulas de entrada; um sistema de drenagem,

constituído por bomba e mangueira; um painel que tem as seleções de tipos de lavagem e um gabinete para dar a estrutura e estética ao conjunto.



Figura 3 – Thor, uma das primeiras máquinas de lavar produzidas em larga escala com motor elétrico – modelo de 1911 (Maxwell, 2009).

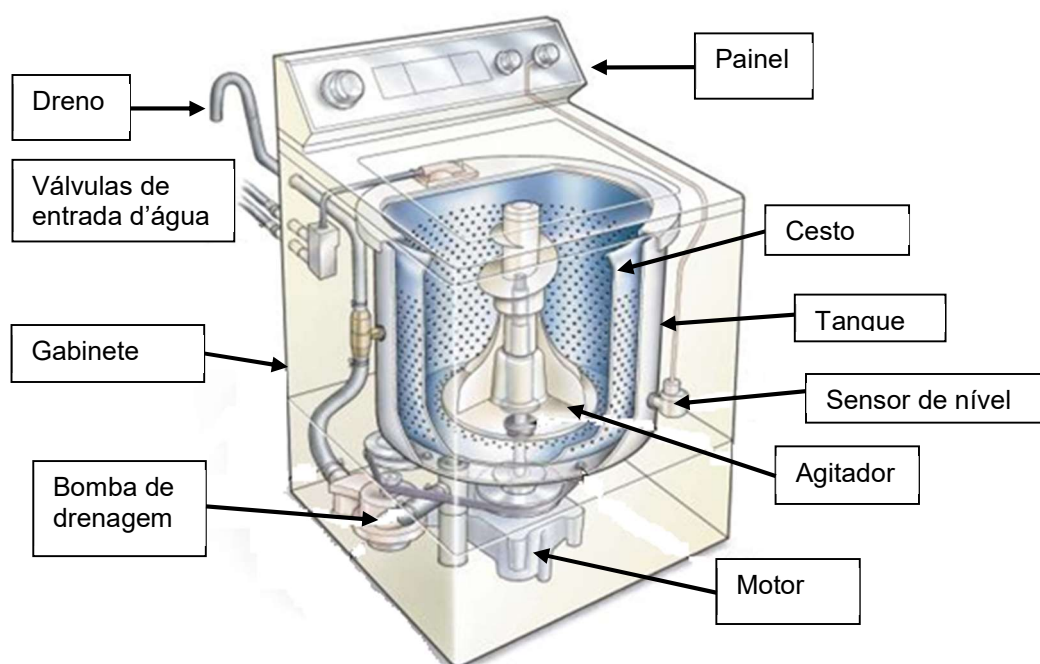


Figura 4 – Esquemático de uma máquina de eixo vertical (adaptado de Hesbenefitingpeople, 2014).

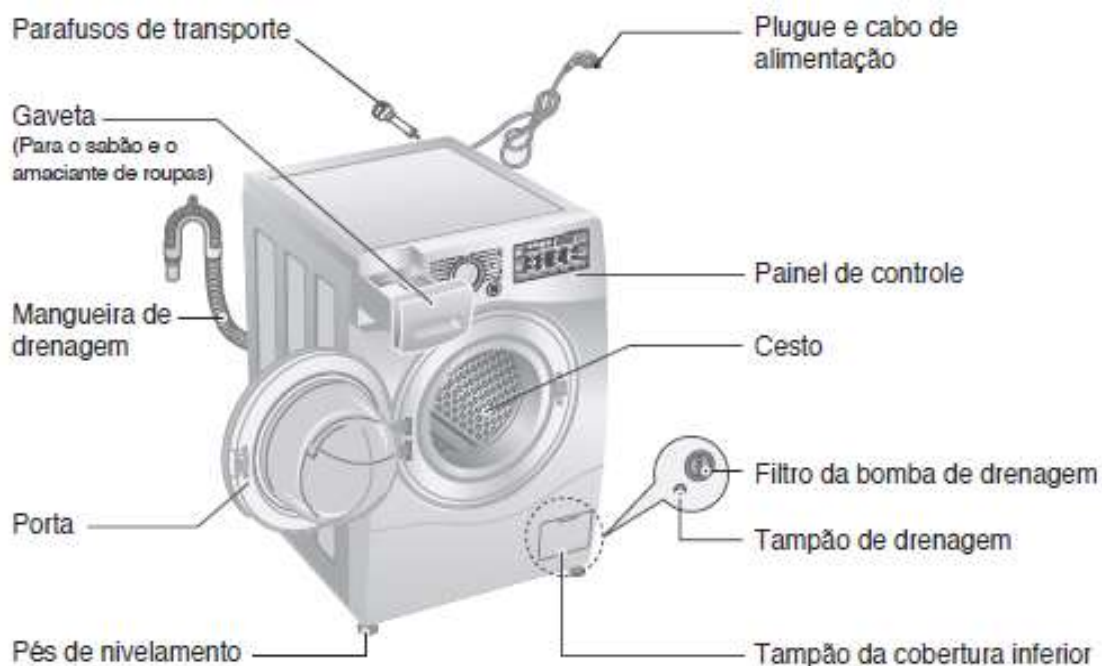


Figura 5 – Esquemático de uma máquina de eixo horizontal (LG, 2015).

As máquinas de eixo horizontal com carregamento também na horizontal (ou *front loaders*) possuem funções semelhantes às de eixo vertical, porém com arquitetura distinta. A principal diferença entre ambas é que, no caso das lavadoras de carregamento frontal, não existe um agitador. Neste caso, o cesto, agora situado no eixo horizontal, é o responsável pela movimentação dos tecidos. Esse compartimento possui pás fixas em sua parede, as quais auxiliam no carregamento da carga a ser lavada. A variação da intensidade de agitação se dá pela velocidade de rotação do cesto bem como pela inversão de giro.

As duas configurações citadas são encontradas atualmente em várias partes do mundo. Todavia, as máquinas de eixo horizontal são predominantes na Europa enquanto as de eixo vertical predominam no continente americano e em alguns países da Ásia e Oceania. Segundo Fuentes (2011), as máquinas *front load* (carregamento frontal e eixo horizontal) representam apenas 10% do mercado brasileiro. Portanto, a opção de eixo vertical que predomina no Brasil estará no foco do presente estudo.

Van den Brekel (1987) elucida que, para uma máquina de lavar de eixo horizontal (alvo da sua pesquisa), os processos envolvidos na lavagem são:

1. Dissolução do detergente.
2. Penetração do detergente no tecido.
3. Remoção da sujeira.

4. Enxágue.
5. Centrifugação.
6. Secagem.

Cada uma das etapas acima apresentadas é também aplicável a uma máquina de eixo vertical. A principal diferença está na forma de extração das manchas. A máquina de eixo horizontal usa o princípio do tombamento, já que o cesto, ao girar, ergue os tecidos através do uso das pás presentes no mesmo. Assim, pela ação da gravidade, as vestes caem em um movimento semelhante às batidas da roupa em pedras nos rios. Já a configuração de eixo vertical utiliza a rotação alternada do agitador sobre os tecidos para esfregá-los e, assim, soltar os resíduos indesejados.

Dentro de ambas as configurações existem diferentes fatores que afetam o modo de lavagem, tais como: parâmetros geométricos (cesto e agitador), perfil de agitação (velocidade, ângulo e sentido de rotação do agitador), quantidade de água, parâmetros químicos (detergente, amaciante, alvejante ou outro aditivo), temperatura da mistura, além de outras configurações de menor relevância. Para quantificar a eficiência da lavação, existem diferentes padrões a serem seguidos, dependendo de cada mercado consumidor. Em geral, há algum tipo de sujeira padronizada (um exemplo é mostrado na Figura 6), cuja remoção é medida através da refletância utilizando aparelhos de medição específicos para tal propriedade. Algumas normas (por exemplo, a AS/NZS 2040.1, 2005) também estipulam que o desgaste da roupa deve ser medido e, para tanto, são utilizados pedaços padronizados de malhas específicas.

Conforme exposto por Ward (2003), existe uma quantidade considerável de parâmetros de projeto e, ao mesmo tempo, incertezas e subjetividade nas medições previstas pelas normas vigentes. Consequentemente, torna-se difícil, segundo o mesmo autor, obter relações de causa-efeito correlacionando os parâmetros de projeto e a resposta do sistema no cenário atual de normas vigentes e metodologia de projeto de produto adotada nas indústrias.

Uma particularidade do mercado brasileiro é o fato de usar a nomenclatura “sabão em pó” ou “sabão líquido” para os produtos de lavanderia responsáveis pela remoção de sujeiras. Segundo Gomes (2011), sabão é composto essencialmente por sais de sódio e potássio provenientes de diversos ácidos graxos. Estes são obtidos a partir de gorduras animais e/ou vegetais. Em contrapartida, o mesmo autor esclarece que detergentes são misturas complexas de várias substâncias, cada qual selecionada para

efetuar uma ação particular durante a limpeza. Considerando que o produto usado em lavanderia é composto por surfactantes, silicatos, enzimas, entre outros, a nomenclatura mais adequada é “detergente em pó” ou “detergente líquido”. No presente trabalho, será adotada a nomenclatura detergente para se referir ao produto químico usado para lavar roupas.



Figura 6 – Tira de sujeiras padronizadas para teste de eficiência de lavagem (IEC, 2010).

Entre os componentes citados, o mais importante, conforme P&G (2008), é o surfactante cujas funções são remover sujeiras oleosas e diminuir a tensão superficial da água e, conseqüentemente, aumentar o grau de molhabilidade. A sua estrutura é composta por uma cabeça hidrofílica e uma cauda hidrofóbica. Com isso, a sujeira é englobada pelo surfactante e emulsificada (conforme mostrado na Figura 7).

Ressalta-se que o processo de limpeza, de acordo com von Rybinski (2007), é dependente de quatro fatores principais: temperatura, ação mecânica, tempo e química (representados na Figura 8). O autor frisa que estes parâmetros são interdependentes e, dependendo do substrato e do tipo de sujeira a ser removida, um fator pode ser predominante. No caso de uma lavadora, a água é o meio através do qual os parâmetros interagem entre si. O atual estudo se restringirá ao processo químico, mais especificamente ao transporte advectivo-difusivo de detergente na lavadora e no tecido.

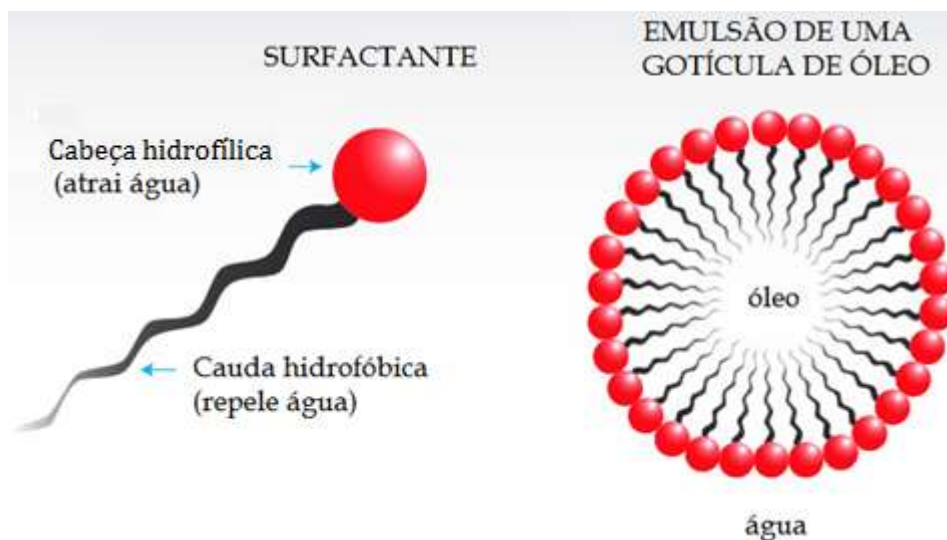


Figura 7 – Surfactante e sua emulsão de uma gotícula de óleo (adaptado de Sciencelearn, 2012).

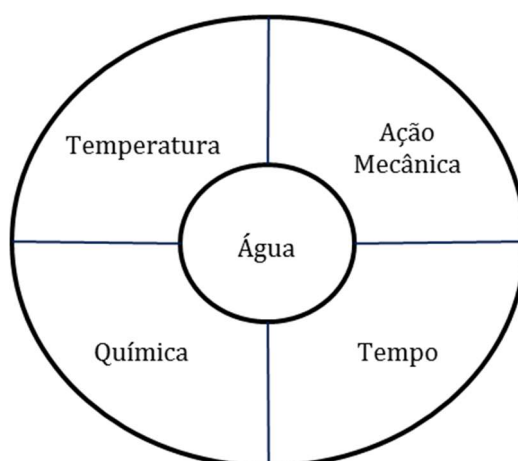


Figura 8 – Fatores que influenciam o processo de limpeza de uma superfície (adaptado de von Rybinski, 2007).

1.2 LITERATURA

Dada a escassez de trabalhos voltados especificamente para o transporte de detergente em máquinas de lavar de eixo vertical na literatura aberta, procurou-se fazer uma busca relacionada à área de lavanderia de modo mais abrangente.

Um trabalho de base para o entendimento do processo de lavagem é o de Kling e Lange (1960), no qual é descrito o processo de desprendimento de sujeiras sólidas e líquidas. Para o caso de partículas líquidas ou oleosas, o fenômeno é governado por dois tipos de interação. O primeiro se refere à tensão interfacial existente entre a sujeira e o

fluido de lavagem. Já o segundo está ligado à diferença da tensão de adesão entre fluido de lavagem com a fibra e óleo com a fibra de tecido, o qual normalmente é mais intenso que o primeiro. No caso de partículas sólidas, a teoria se torna mais complexa e pode vir a ser explicada não só através da relação das forças de atração, mas também pela repulsão elétrica. Através dos cálculos dessas forças podem ser obtidas as barreiras de energia necessárias para a separação da partícula da fibra bem como para a sua redeposição.

Matsui *et al.* (1976 e 1977) publicaram uma série de artigos relacionados à lavagem de tecidos. No primeiro, de 1976, é feito um estudo da lavagem de tecidos de algodão com uma abordagem teórica. Estudou-se o efeito da temperatura, da agitação e da espessura dos tecidos ao lavá-los com soda cáustica. Foram feitas tanto análises experimentais quanto teóricas, estas baseadas em modelos difusivos, nos quais o tecido foi considerado como uma substância homogênea. Os autores concluíram que a lavagem de tecidos de algodão com soda cáustica apresentou resultados alinhados com a teoria de difusão. Além disso, a eficiência da extração da soda foi altamente afetada ao se lavar com agitação e com o efeito de se espremer o tecido. Os autores não deixaram claro o motivo da escolha da soda cáustica como elemento de análise e sua correlação com insumos de lavanderia, como por exemplo, os detergentes.

No segundo artigo, publicado em 1977, o objetivo era analisar a transferência de massa num conjunto de fibras através da teoria da difusão. Os autores destacam que o coeficiente de difusão de uma substância química em uma fibra difere consideravelmente do mesmo elemento inserido na água. Assumiu-se que uma fibra pode ser descrita como uma coluna e um conjunto de fibras como um plano. Baseando-se nas equações de difusão de massa, foram feitas análises e desenvolvimentos teóricos para descrever o resíduo de um rastreador num conjunto de fibras. Foram realizados experimentos, cujos resultados foram comparados com os modelos teóricos. Nos casos de lavagem com água parada houve boa concordância, já para as condições com agitação foram observadas divergências, o que se deve ao fato dos autores não terem considerado os efeitos advectivos em seu modelo. Além do mais, a abordagem realizada foi, de certa forma, simplista; ou seja, feita em condições bastante diferentes do processo de lavagem de tecidos através de lavadoras.

A tese de doutorado de van den Brekel (1987) procurou evidenciar quais são os fatores determinantes para os processos de transferência de massa numa máquina de lavar doméstica de eixo horizontal. Seu foco está principalmente no aspecto químico, já

que a pesquisa foi patrocinada por uma grande indústria da área de detergentes. O autor procurou criar modelos globais, baseados em conceitos de engenharia química, que pudessem representar o comportamento da máquina em condições com ausência ou presença de tecidos. Em ambos os casos foram realizados experimentos para a validação. Assumiu-se que existe advecção nas regiões entre os fios e difusão no interior dos fios. Constatou-se, a partir dos testes feitos utilizando lavadoras, que o processo dominante para a transferência de massa é o fluxo entre os fios (advecção) ao passo que a difusão nos fios só se torna fator determinante para condições com poucos tecidos. As conclusões obtidas reforçam a importância em se aumentar o fluxo mássico no interior do tecido para se atingir mais rapidamente a homogeneização.

Outro pesquisador holandês, van der Donck, publicou em 1997 um artigo sobre a influência da compressão em tecidos úmidos. Neste, almejou-se modelar o fluxo de água devido à compressão do tecido. A razão de se estudar tal comportamento é que, segundo o autor, a lavagem de tecidos pode ser descrita pela transferência de massa causada pela ação mecânica, que seria uma consequência da compressão de aglomerados de tecidos dos quais sai água do seu interior. Por conseguinte, ao se aumentar a compressão, o fluxo se elevaria e a eficiência da lavagem melhoraria. A compressão sofrida pelo tecido foi analisada através do modelo proposto por van Wyk (1946) e a tensão na água foi modelada pelo autor considerando o escoamento através de um meio poroso. Através dos experimentos realizados, obteve-se concordância entre os valores medidos e os modelos utilizados. A ação mecânica retratada pelo pesquisador é uma realidade para máquinas de eixo horizontal, cujo princípio de agitação se dá pelo tombamento dos tecidos.

Outra tese de doutorado de interesse é a de Gooijer (1998), na qual se procurou encontrar relações entre parâmetros geométricos do tecido e a resistência ao escoamento em materiais têxteis. Com foco em materiais para filtração, na pesquisa são citados três tipos de modelo para prever a resistência ao fluxo: de poros, de arrasto e de orifício. Para o último, o autor propõe uma nova abordagem baseada na geometria do poro. Cada qual possui vantagens e aplicações nas quais os resultados apresentam maior convergência. O autor estendeu a sua pesquisa para casos onde o fio dos tecidos era composto por um ou vários filamentos. Ele também caracteriza os tecidos através de propriedades como a espessura e a distribuição dos poros. As análises feitas na tese em discussão são de grande valia para modelos que consideram os efeitos microscópicos dos tecidos, porém não há qualquer avaliação das características relacionadas à lavagem e/ou remoção de sujeiras.

Charrette *et al.* (2001) estudaram o processo de transferência de massa em tecidos feitos de algodão para calcular a eficiência global da lavação. Para tanto, criaram modelos simplificados das etapas de limpeza em uma lavadora industrial, a qual possui compartimentos de água em série. Os tecidos são transportados durante todo o processo por rolos. Os autores executaram experimentos e compararam os resultados com modelos teóricos obtendo boa compatibilidade. Contudo, a pesquisa realizada difere do presente estudo principalmente por dois motivos: o primeiro se refere às diferenças existentes em lavadoras industriais e domésticas, tais como a arquitetura utilizada e a forma de limpeza. Além disso, utilizou-se como elemento rastreador o cloreto de sódio, cuja relação com os detergentes de lavanderia não foi detalhada.

A pesquisa realizada por Warmoeskerken *et al.* (2002) trata do uso da tecnologia de ultrassom para intensificar o processo de lavagem. Os autores defendem a ideia de que, para melhorar a eficiência de lavagem, é preciso aumentar a transferência de massa. Segundo os pesquisadores, existe uma região no interior dos tecidos que não sofre a interferência do fluxo de fluido de lavação. Para diminuir esta parcela, são mencionados dois caminhos. O primeiro deles é pela compressão dos tecidos, conforme proposto por van der Donck (1997), o que está relacionado com a rotação do cesto em lavadoras de eixo horizontal. A segunda alternativa é o uso de ultrassom, que foi testado e apresentou uma remoção de cloreto de sódio consideravelmente maior se comparado com o processo padrão de lavagem. Os autores ressaltam que essa é uma tecnologia promissora, mas que muita pesquisa ainda precisa ser feita para torná-la viável em lavadoras domésticas. Analisa-se que o caminho proposto no artigo em questão pode vir a ser uma boa opção no futuro, entretanto, as investigações realizadas são voltadas para lavadoras de eixo horizontal e o rastreador utilizado não é um insumo de lavanderia.

No ano de 2007, Akcabay publicou um estudo dos aspectos físicos do escoamento de água e roupa em uma máquina de lavar. O autor buscou desenvolver uma ferramenta que pudesse simular a interação entre a roupa e a água. O modelo utilizado para a roupa foi baseado no trabalho de Love (1944), o qual consiste em placas finas elásticas com grande deformação. Já para a interação entre roupa e fluido, o modelo escolhido foi o chamado “fronteiras imersas” publicado por Peskin (1972). O estudo de Akcabay (2007) não chegou a ser validado experimentalmente, mas foram feitas comparações com soluções analíticas e experimentos com geometrias simplificadas. Em nenhum momento

do referido trabalho foi levado em conta o processo de transferência de massa na lavagem de tecidos.

Ainda no ano de 2007, St. Laurent *et al.* apresentaram um estudo no qual é feito um compilado de vários aspectos que envolvem a lavagem de tecidos. São abordados tópicos como tipos de fibra, tipos de sujeiras, mecanismos de remoção de sujeiras, composição de detergentes e função de cada um dos principais elementos que os compõe. Discutem-se também diferentes metodologias de testes e tendências para o futuro. Comenta-se, na pesquisa dos referidos autores, da existência e influência de interações entre lavadora e detergente, mas as mesmas não são investigadas com profundidade.

Outro trabalho na área de lavanderia é o de Eger (2010), no qual escoamentos turbulentos sob a ação de rotação alternada são estudados. Para tanto, foram utilizadas simulações numéricas considerando um reservatório cilíndrico com um perfil triangular na base que rotaciona alternadamente ao redor de um eixo. Para validar o modelo, foram realizados experimentos com um anemômetro de fio quente. O autor concluiu que a geometria do rotor com dois ressaltos é a que demanda menor potência do motor e a geradora de maior turbulência no fluido. Já a configuração com quatro ressaltos é a que induz maiores velocidades no fluido. Outra conclusão é a existência de um nível ótimo para ocorrer a mistura. Nas simulações realizadas pelo autor, não foi incluída a transferência de massa, ficando em aberto este aspecto da lavagem.

Mais recentemente, Yee (2013) também realizou simulações numéricas da lavagem de tecidos, mas, diferentemente de Eger (2010), foram utilizadas geometrias de dispositivos de agitação comerciais. Através dos estudos numéricos, observaram-se diferentes níveis de turbulência entre os agitadores, bem como o comportamento do fluido (água). O trabalho de Yee (2013) foi comparado com resultados experimentais apresentados por Machado Jr. (2014). As respostas do torque entregue ao fluido de lavagem tiveram comportamentos similares, apesar da divergência de valores (menor que 30%). As pesquisas citadas almejaram a quantificação da transferência da quantidade de movimento, mas desconsideraram o transporte de detergente.

Analisa-se, através da revisão bibliográfica apresentada, que a literatura na área de lavanderia é escassa, ao menos, na literatura aberta. Destaca-se que vários dos trabalhos encontrados foram realizados com o suporte de indústrias relacionadas ao processo de lavagem (fabricantes de equipamentos e/ou de insumos). Dos trabalhos citados, o que mais se aproxima da presente pesquisa é a tese de van den Brekel (1987),

apesar do foco em máquinas de eixo horizontal. Dessa forma, o presente trabalho pretende complementar e avançar o conhecimento sobre o processo de transferência de detergentes em lavadoras domésticas de eixo vertical.

1.3 OBJETIVOS E METODOLOGIA

O objetivo principal do trabalho consiste em entender o transporte de detergente no processo de lavagem de tecidos em lavadoras domésticas de eixo e carregamento vertical.

Para que o escopo principal seja atingido, os seguintes objetivos específicos foram perseguidos, os quais definiram a metodologia do trabalho:

- Estudar a literatura existente relacionada à lavanderia.
- Desenvolver uma metodologia de ensaios capaz de captar as variações de concentração do detergente nos diferentes compartimentos envolvidos na lavação.
- Executar experimentos em bancada sob diferentes configurações de operação.
- Criar um modelo computacional que represente o fenômeno de transporte de detergente e validá-lo com os experimentos realizados.
- Ajustar o modelo para que o mesmo possa ser uma ferramenta preditora do comportamento do sistema dentro dos limites testados e validados.

Para atingir os objetivos específicos, a metodologia de desenvolvimento foi:

- O modelo numérico foi baseado no trabalho de van den Brekel (1987) a partir do qual foram feitas adaptações.
- Cada compartimento é considerado um volume de controle e é feito um balanço de massa no mesmo.
- Os cálculos das equações diferenciais governantes são feitos através de um integrador com incremento de tempo preditor e adaptativo.
- A sensibilidade é avaliada através de experimentos fatoriais.

1.4 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

Esta dissertação foi dividida em cinco partes de tal forma que:

- No Capítulo 1 é apresentada a introdução ao tema em estudo. Nesta parte consta o contexto no qual o trabalho está inserido bem como a revisão da literatura e, por fim, os objetivos e metodologias adotadas.
- O Capítulo 2 trata dos modelos envolvidos, tanto o físico quanto o numérico. São apresentadas as equações governantes e o método de solução empregado.
- Encontra-se no Capítulo 3 a metodologia experimental desenvolvida e adotada nos testes realizados. Discute-se a respeito das possíveis grandezas a serem medidas, locais e intervalo de coleta das amostras como também sobre testes em lavadoras com e sem tecidos.
- Constam no Capítulo 4 os experimentos realizados e resultados obtidos. São mostradas as condições e a sequência adotada nos testes, além das análises dos valores nos mesmos. A adequação do modelo numérico aos valores experimentais e sua interpretação estão descritas nesse capítulo
- Apresentam-se, por fim, no Capítulo 5, as conclusões do trabalho e propostas para futuros estudos.

2 MODELAGEM MATEMÁTICA

2.1 MODELO FÍSICO

2.1.1 Transferência de massa

O presente estudo tem seu foco voltado para uma melhor compreensão do comportamento do detergente que transita em diferentes partes de uma máquina de lavar de eixo vertical. Assim, o fenômeno de transporte em questão é a transferência de massa, a qual pode ser conceituada, conforme Incropera *et al.* (2008), como sendo massa em trânsito como resultado de uma diferença de concentrações de uma espécie em uma mistura. Os dois principais modos de transporte de massa são, segundo os mesmos autores, a advecção e a difusão. No primeiro tipo, o traslado está associado ao movimento global do fluido (escala macroscópica); já no segundo, o transporte está ligado a movimentos moleculares aleatórios dentro da mistura (nível microscópico).

Para uma melhor compreensão das deduções a seguir, deve-se considerar o volume de controle retratado na Figura 9.

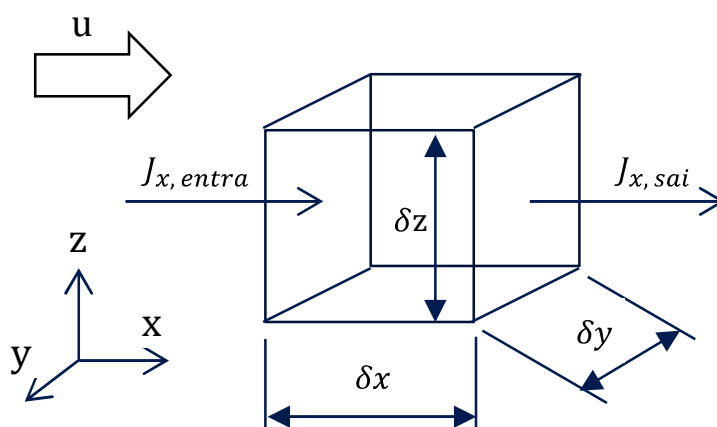


Figura 9 – Representação esquemática de um volume de controle com escoamento com velocidade u na direção x .

A equação governante do processo é obtida através de um balanço de massa realizado no volume de controle mostrado na Figura 9, donde se obtém:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \sum \dot{M}_{entra} - \sum \dot{M}_{sai} + C''' \delta V \quad (1)$$

onde M representa a massa, \dot{M} corresponde à taxa de massa que atravessa a superfície em análise, C''' a geração de concentração no volume diferencial δV ($\delta x \delta y \delta z$). Uma possível fonte de geração seria um aglomerado de material que é dissolvido aos poucos.

Para efeito de simplificação, será considerado apenas o fluxo na direção x . O fluxo J_x representa a massa da espécie química de interesse que atravessa a superfície de controle:

$$J_x = uC + q_x \quad (2)$$

onde u é a velocidade na direção x , C equivale à concentração, uC é o fluxo advectivo e q_x refere-se ao fluxo difusivo, descrito através da Lei de Fick:

$$q_x = -D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (3)$$

onde D é a difusividade de massa da espécie de interesse na mistura [m^2/s]. Substituindo (3) em (2), obtém-se:

$$J_x = uC - D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (4)$$

A variação entre as taxas de entrada e saída de massa, para o volume de controle em análise, agora pode ser definida como:

$$\begin{aligned} \delta \dot{m}|_x &= J_{x,entra} \delta y \delta z - J_{x,sai} \delta y \delta z \\ &= \left(uC - D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \Big|_x \delta y \delta z - \left(uC - D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \Big|_{x+\delta x} \delta y \delta z \end{aligned} \quad (5)$$

Com o uso de séries de Taylor, obtém-se para o termo advectivo:

$$uC|_x - uC|_{x+\delta x} = uC|_x - \left(uC|_x + \frac{\partial(uC)}{\partial x} \Big|_x \delta x \right) = -\frac{\partial(uC)}{\partial x} \delta x \quad (6)$$

Analogamente, para a parcela difusiva, tem-se:

$$\begin{aligned} -D \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_x - \left(-D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \Big|_{x+\delta x} &= -D \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_x - \left(-D \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_x - \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \Big|_x \delta x \right) \\ &= D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \delta x \end{aligned} \quad (7)$$

Substituindo (6) e (7) em (5), obtém-se, para uma difusividade uniforme:

$$\delta \dot{m}|_x = \frac{\partial(uC)}{\partial x} \delta x \delta y \delta z + D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \delta x \delta y \delta z \quad (8)$$

Nas direções y e z executa-se o mesmo procedimento e, com isso, chega-se a:

$$\delta \dot{m}|_y = \frac{\partial(vC)}{\partial y} \delta x \delta y \delta z + D \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \delta x \delta y \delta z \quad (9)$$

$$\delta \dot{m}|_z = \frac{\partial(wC)}{\partial z} \delta x \delta y \delta z + D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \delta x \delta y \delta z \quad (10)$$

Retornando a equação (1), considerando que $M = C \delta x \delta y \delta z$, obtém-se:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \left[\frac{\partial(uC)}{\partial x} + \frac{\partial(vC)}{\partial y} + \frac{\partial(wC)}{\partial z} \right] + D \left[\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right] + C''' \quad (11)$$

onde C''' representa um termo fonte.

A equação (11) representa o transporte advectivo-difusivo de massa da espécie de interesse na mistura. Nota-se, a partir da mesma, que o termo temporal (lado esquerdo da equação) depende da parcela advectiva, difusiva e fonte, primeiro, segundo e terceiro termos do lado direito da equação, respectivamente.

Por se tratar de um escoamento em meios porosos (o fluido atravessa tecidos), deve ser levada em conta a porosidade (ε) e a tortuosidade do meio (τ). Isto é obtido através da chamada difusividade efetiva, descrita como:

$$D_{ef} = \frac{D\varepsilon}{\tau} \quad (12)$$

A equação (11) serviu de base para os modelos numéricos implementados no decorrer da presente pesquisa.

2.1.2 Adimensionalização da equação governante

O fato de adimensionalizar a equação que rege o escoamento pode auxiliar a compreensão dos aspectos físicos envolvidos. Com esse intuito, os elementos que compõem a equação (11) foram substituídos pelos seus equivalentes adimensionais.

Considera-se agora um escoamento com transferência de massa sobre um determinado corpo. Admitindo-se que o escoamento possui velocidade U_∞ e concentração C_∞ longe do corpo, cuja concentração superficial é C_s . Com base em tais parâmetros, os seguintes grupos adimensionais, apresentados por Incropera *et al.* (2008), podem ser obtidos:

$$C^* = \frac{C - C_s}{C_\infty - C_s} \quad (13)$$

$$Pe = \frac{U_{\infty} L}{D} \quad (14)$$

$$Fo = \frac{Dt^2}{L^2} \quad (15)$$

$$x^* = \frac{x}{L} \quad (16)$$

$$y^* = \frac{y}{L} \quad (17)$$

$$z^* = \frac{z}{L} \quad (18)$$

$$u^* = \frac{u}{U_{\infty}} \quad (19)$$

$$v^* = \frac{v}{U_{\infty}} \quad (20)$$

$$w^* = \frac{w}{U_{\infty}} \quad (21)$$

onde L é o comprimento característico do corpo. Admite-se ainda que x^* , y^* e z^* são as coordenadas adimensionais em cada direção. Da mesma forma, u^* , v^* e w^* são as velocidades adimensionalizadas em cada direção. Logo, a seguinte equação adimensional pode ser obtida para a conservação da massa, considerando ausência de termo fonte:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C^*}{\partial Fo} = \frac{1}{Pe} \left(\frac{\partial^2 C^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 C^*}{\partial y^{*2}} + \frac{\partial^2 C^*}{\partial z^{*2}} \right) \\ - \left(\frac{\partial(C^* u^*)}{\partial x^*} + \frac{\partial(C^* v^*)}{\partial y^*} + \frac{\partial(C^* w^*)}{\partial z^*} \right) \end{aligned} \quad (22)$$

Tal equação evidencia que, para escoamentos a alto Péclet (Pe), os termos difusivos podem ser desprezados. Tal hipótese será empregada na modelação do transporte de massa entre os tecidos. Em contrapartida, a difusão tem papel primordial em situações nas quais o fluxo de líquido deve atravessar várias camadas de tecido, que se caracteriza por um número de Péclet baixo.

2.1.3 Transferência de detergente em uma lavadora de eixo vertical

O processo de limpeza, segundo von Rybinski (2007), ocorre devido a uma sinergia entre fatores mecânicos, térmicos, químicos e tempo. Tais fatores se combinam com o objetivo de remover sujeiras do tecido. Nesse processo, conforme consta em

Warmoeskerken *et al.* (2002), duas etapas podem ser distinguidas: o desprendimento da sujeira e, na sequência, o transporte da mesma. Os autores explicam que, no primeiro estágio, forças físicas de ligação entre a sujeira e o substrato são quebradas. A partir de então, o material é transportado para a água presente na lavagem. Para que a primeira etapa ocorra adequadamente, a presença de detergentes é fundamental. Assim, a massa aqui estudada é a do detergente, o qual transita em diferentes compartimentos de uma lavadora, conforme mostrado esquematicamente na Figura 10.

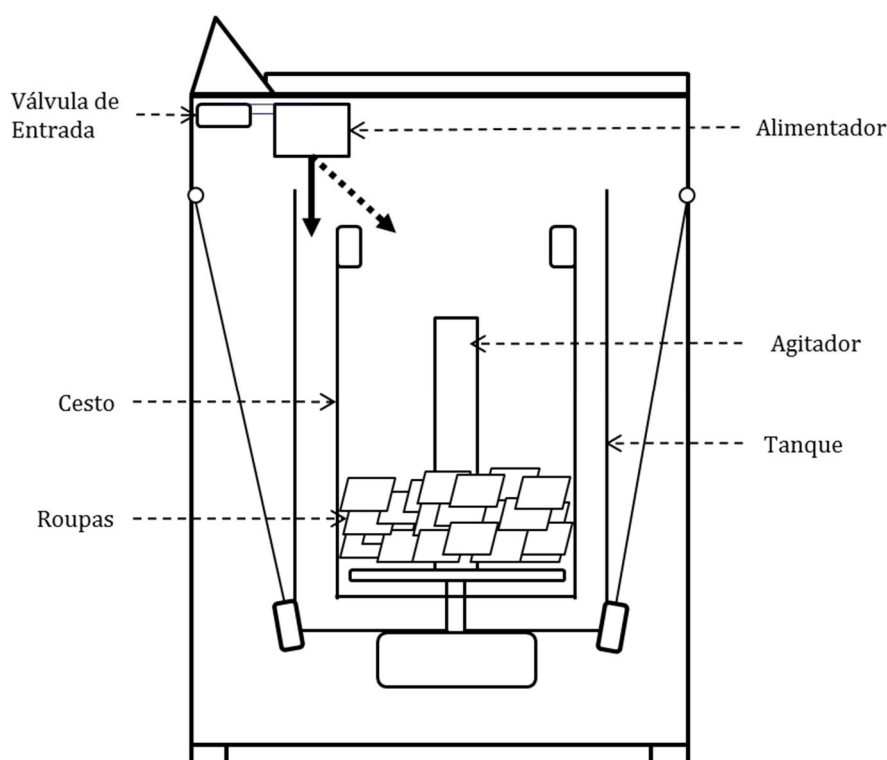


Figura 10 – Representação esquemática em corte transversal de uma máquina de lavar de eixo vertical evidenciando os locais de mistura.

A água chega ao conjunto através da válvula de entrada e esta conduz o fluido até o alimentador. Este é o local aonde são colocados os produtos químicos tais como detergente, amaciante e alvejante (apenas o primeiro foi considerado neste trabalho). A solução de água e detergente é inserida ou no cesto (linha tracejada) ou no tanque (linha contínua), dependendo da configuração escolhida pelo fabricante do aparelho. Em ambos os casos ocorrerá a transferência de detergente entre tanque e cesto, já que o cesto é perfurado. Uma vez que o insumo esteja presente no cesto, haverá novamente transferência de massa entre o líquido contido nesse compartimento com os tecidos. Portanto, a concentração de detergente nos locais citados varia no decorrer do tempo, sendo esta uma variável de interesse. Idealmente, o tempo necessário para a concentração

de detergente no interior das roupas atingir a concentração de equilíbrio (C_∞) deve ser o menor possível para se ter uma lavagem homogênea.

2.1.4 Modelo físico aplicado a uma lavadora de eixo vertical

Dentre a literatura encontrada, o conceito proposto por van den Brekel (1987) serviu de referência para a definição da forma como o processo de lavagem pode ser modelado. Baseado na sua experiência de engenheiro químico, o autor utilizou conceitos de engenharia de reações. Assim, ele considerou que tanto o tanque como o cesto podem ser representados como reatores químicos. Já a roupa foi tratada como uma sucessão de pequenos tanques em série, conforme explicado por Levenspiel (1998), resultando na estrutura apresentada na Figura 11.

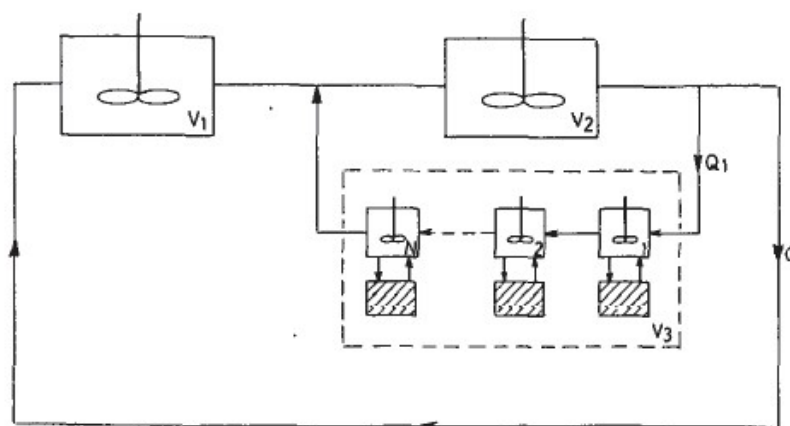


Figura 11 – Modelo de reatores e tanques em série (van den Brekel, 1987)

onde V_1 é o volume de fluido presente no tanque e V_2 é o volume presente no cesto desconsiderando o volume da solução presente na roupa (V_3). Há também uma vazão entre o tanque e cesto nomeada de Q , assim como uma vazão entre o cesto e as roupas Q_1 .

No presente trabalho, uma vez que não se tem interesse na reação química, mas sim no transporte de detergente, o modelo se baseou em um arranjo de volumes de controle como mostra a Figura 12. O primeiro deles, da esquerda para a direita, é o volume morto, o segundo corresponde ao tanque, enquanto o terceiro é o cesto. Os tecidos são divididos em dois domínios, um deles consiste numa série de volumes que modelam as camadas de tecido da sonda utilizada (ver Figura 33) enquanto o outro se refere ao resto da massa de tecidos presente na máquina.

O balanço de massa em cada um dos volumes de controle será apresentado na sequência, evidenciando as vazões envolvidas e as considerações empregadas. Para todos os casos, a equação (11) serviu de ponto de partida. O problema também foi considerado global (*lumped*), sem termo fonte e com vazões constantes.

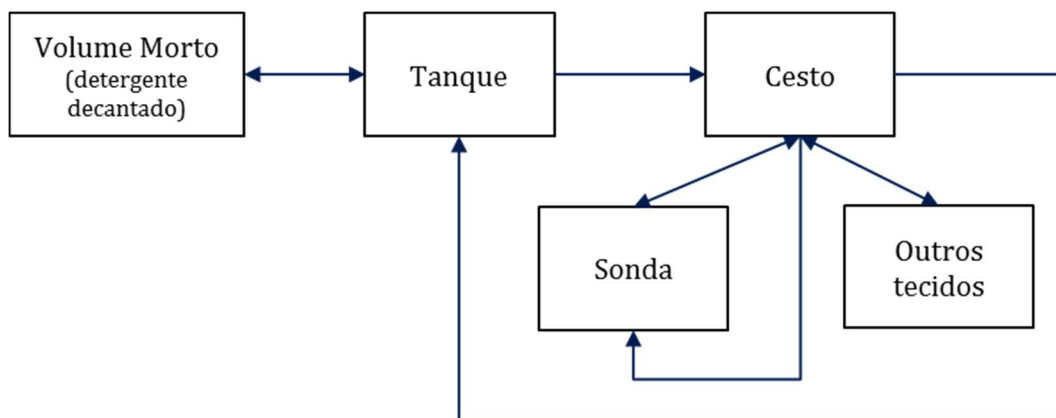


Figura 12 – Modelo simplificado utilizado no atual estudo.

2.1.4.1 Balanço de massa no tanque

No tanque, foram desconsiderados efeitos difusivos, pois o fator dominante é a advecção existente entre ele e os outros compartimentos. A Figura 13 apresenta em detalhe os fluxos existentes no volume de controle em questão.

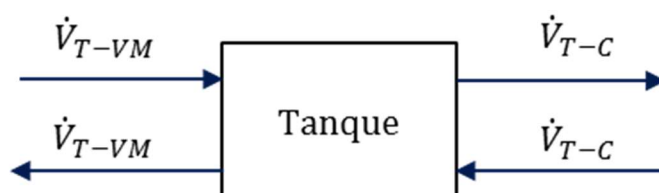


Figura 13 – Vazões volumétricas que atuam no volume de controle do tanque.

Na figura acima, a vazão volumétrica entre o tanque e cesto é apresentada como \dot{V}_{T-C} , enquanto \dot{V}_{T-VM} corresponde à vazão entre o tanque e o volume morto, que ocorre nos casos em que o detergente é inserido no tanque. No procedimento de teste a ser descrito no Capítulo 4, entre o término do enchimento e o início da agitação, foi reservado um tempo de 15 segundos para a inserção do detergente. Isto posto, assume-se que parte do detergente inserido decanta e permanece no fundo do tanque.

Dessa forma, o balanço de massa a ser usado no tanque é definido por:

$$\frac{dC_T}{dt} = \frac{\dot{V}_{T-C}}{V_T}(C_C - C_T) + \frac{\dot{V}_{T-VM}}{V_T}(C_{VM} - C_T) \quad (23)$$

onde V_T é o volume de líquido presente no tanque e os termos $C_{...}$ representam as concentrações nos volumes de controle do cesto, tanque e volume morto.

Para os casos nos quais a adição do insumo foi feita no cesto, não foi preciso considerar a existência de um volume decantado, tal que, a equação (23) transforma-se em:

$$\frac{dC_T}{dt} = \frac{\dot{V}_{T-C}}{V_T}(C_C - C_T) \quad (24)$$

Destaca-se o fato de que na vazão volumétrica está embutida a velocidade da equação do transporte advectivo.

2.1.4.2 Balanço de massa no volume morto

Conforme mencionado no balanço de massa do tanque, ao se inserir o detergente no tanque, fez-se uso de um volume de controle adicional para representar o detergente que decanta durante o processo de inserção. A Figura 14 apresenta as vazões que incidem sobre o volume morto.

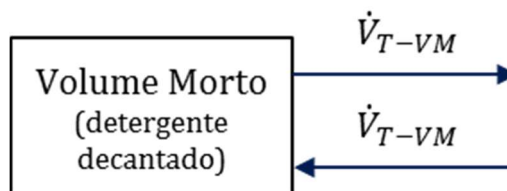


Figura 14 - Vazões volumétricas que atuam no volume morto.

Em tal local, considerou-se que os fluxos são essencialmente advectivos visto que o escoamento é gerado pelo movimento do agitador. Portanto, a transferência de massa no volume de controle pode ser equacionada como:

$$\frac{dC_{VM}}{dt} = \frac{\dot{V}_{T-VM}}{V_{VM}}(C_T - C_{VM}) \quad (25)$$

onde V_{VM} corresponde ao volume presente entre o fundo do cesto e o fundo do tanque.

2.1.4.3 Balanço de massa no cesto

Por ser o local com maior interação entre os componentes envolvidos no processo de lavagem, o cesto apresenta o balanço de massa mais complexo. A Figura 15 mostra todas as interações existentes que envolvem o compartimento em análise. Nela constam duas novas vazões volumétricas, uma relacionada com a quantidade de fluido que é direcionado aos tecidos (\dot{V}_{C-o}) e outra que relaciona o cesto e o meio da sonda (\dot{V}_{C-N}). Na primeira delas existe uma fração α que representa a parcela dessa vazão que vai para os outros tecidos além da sonda. O restante da mesma é utilizado na primeira camada da sonda. A segunda vazão volumétrica existe pelo fato de que o tecido no qual são feitas as coletas não é integralmente fechado, ou seja, existe um fluxo que passa pelas frestas do mesmo.

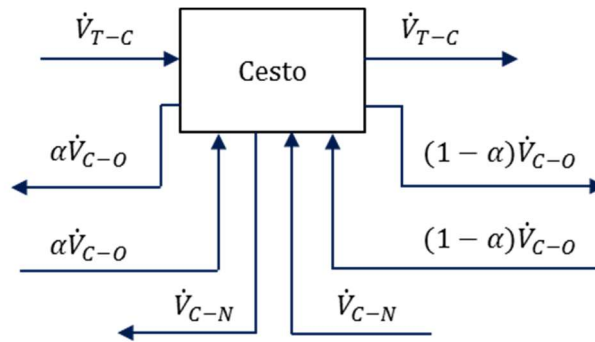


Figura 15 – Vazões volumétricas que atuam no volume de controle do cesto.

Também foram desconsiderados os efeitos difusivos no cesto. Dessa forma, a equação governante do volume de controle em questão é:

$$\begin{aligned} \frac{dC_C}{dt} = & \frac{\dot{V}_{T-c}}{V_C} (C_T - C_C) + \frac{(1-\alpha)\dot{V}_{C-o}}{V_C} (C_o - C_C) + \frac{\alpha\dot{V}_{C-o}}{V_C} (C_1 - C_C) \\ & + \frac{\dot{V}_{C-N}}{V_C} (C_N - C_C) \end{aligned} \quad (26)$$

onde V_C é o volume de líquido presente no cesto e os termos $C_{...}$ ainda não apresentados se referem às concentrações nos tecidos, na primeira camada (C_1) e no meio da sonda (C_N).

2.1.4.4 Balanço de massa nos tecidos

O terceiro volume de controle a ser analisado é o que representa os tecidos de modo global. Diferentemente de van den Brekel (1987), não se considerou a carga como uma sucessão de tanques em série. No presente trabalho, admitiu-se que os tecidos têm certo grau de liberdade entre eles e, conseqüentemente, não criam aglomerados de tecidos. Esta hipótese foi confirmada ao se realizarem experimentos. Além disso, não existem várias camadas que o fluido necessita passar, pois a espessura do tecido é bastante inferior em relação à sua área superficial. Portanto, além de considerar a massa total de tecidos como um sistema único, descartaram-se efeitos difusivos.

A Figura 16 destaca as vazões existentes entre os tecidos e o meio.

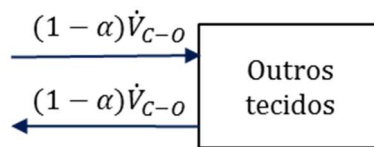


Figura 16 – Vazões volumétricas que atuam no volume de controle dos outros tecidos que não a sonda.

A equação (27) é o balanço de massa aplicado ao equivalente da massa de tecidos inserida no cesto da lavadora.

$$\frac{dC_o}{dt} = \frac{(1 - \alpha)\dot{V}_{C-o}}{V_o} (C_c - C_o) \quad (27)$$

onde V_o é o volume de líquido presente no tecido. Este foi definido a partir da massa inserida, densidade do tecido e sua porosidade.

2.1.4.5 Balanço de massa na sonda

A sonda é o elemento utilizado para coletar as amostras e é feita a partir do mesmo material (fronha de algodão) e massa dos outros tecidos. Conforme será mostrado na seção 3.3, ela é composta por uma sucessão de camadas de tecidos. A quantidade das mesmas (N) foi definida pelo número de partes de tecido que o fluido precisa atravessar para atingir ao meio da sonda (ponto de captura da amostra). Sendo assim, adotou-se um modelo de camadas que interagem entre si por difusão, sendo que a primeira e a última interagem com o meio na qual a mesma está inserida por advecção. A representação esquemática do volume de controle em questão é mostrada na Figura 17.

Diferentemente dos volumes de controle estudados anteriormente, para a sonda os efeitos difusivos são importantes. As análises do transporte de massa foram separadas em três tipos de elementos, que serão mostrados a seguir, baseados na integração da equação governante através do método dos volumes finitos.

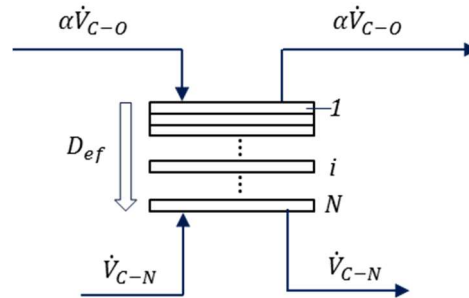


Figura 17 – Vazões volumétricas e difusividade efetiva que atuam no volume de controle da sonda.

i. Primeira camada

A parte mais externa da sonda está em contato com o fluido livre presente no cesto, com o qual troca massa por advecção. Já para a camada subsequente, a transferência é dada por difusão através do meio poroso. Isto é representado graficamente na Figura 18.

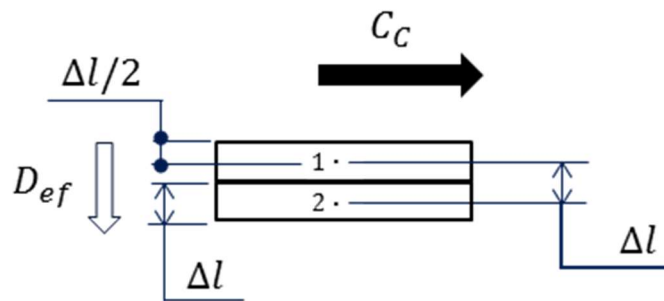


Figura 18 – Representação esquemática da primeira camada da sonda.

Na Figura 18, Δl representa a espessura de cada camada da sonda. A transferência de massa para este caso é dada por:

$$\frac{dC_1}{dt} = \frac{\alpha \dot{V}_{C-o}}{V_S} (C_C - C_1) + \frac{D_{ef}}{\Delta l^2} (2C_C + C_2 - 3C_1) \quad (28)$$

onde V_S é o volume de líquido presente em cada camada da sonda. A dedução da equação (28) encontra-se no Apêndice I.

ii. Camada intermediária

No caso de uma camada situada no meio, considerou-se que o processo é regido pela difusividade efetiva. A representação deste elemento é mostrada na Figura 19.

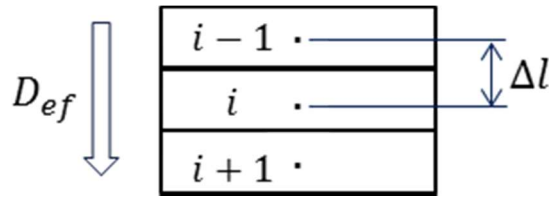


Figura 19 – Representação esquemática de uma camada intermediária da sonda.

Neste caso a equação governante é a descrita por:

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{D_{ef}}{\Delta l^2} (C_{i-1} + C_{i+1} - 2C_i) \quad (29)$$

Esta equação também foi deduzida no Apêndice I.

iii. Camada do meio

Por fim, o local onde se faz as coletas de amostras de líquidos que posteriormente serão analisados para obter a concentração de detergente é apresentado na Figura 20. Destaca-se o fato de haver novamente advecção no último elemento já que, conforme mencionado no início desta seção, existem imperfeições de vedação da sonda que permitem que ocorram vazamentos.

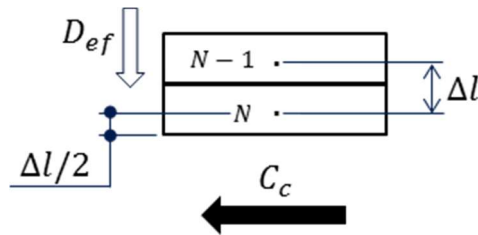


Figura 20 – Representação esquemática da camada do meio da sonda.

Assim, o balanço de massa, demonstrado no Apêndice I, é dado por:

$$\frac{dC_N}{dt} = \frac{\dot{V}_{C-N}}{V_S} (C_C - C_N) + \frac{D_{ef}}{\Delta l^2} (C_{N-1} - C_N) \quad (30)$$

2.2 ESQUEMA NUMÉRICO

2.2.1 Método de solução

Para cada volume de controle apresentado existe uma equação diferencial que descreve a variação temporal da concentração de detergente. Todas elas são do tipo ordinárias e precisam ser resolvidas simultaneamente. Normalmente, as soluções são

obtidas a partir de truncamentos da série de Taylor. Considerando uma função cuja solução em $x_{i+1} = x_i + h$ é desejada, onde h é o incremento, tem-se:

$$y(x_{i+1}) = y(x_i + h) = y(x_i) + hf[x_i, y(x_i)] + \frac{h^2}{2!} f'[x_i, y(x_i)] + \dots \quad (31)$$

onde $f = \frac{dy}{dx}$ e $f' = \frac{d^2y}{dx^2}$, e assim sucessivamente.

Um dos métodos numéricos para resolver a equação (31) foi proposto no século XVIII por Leonhard Euler. O método consiste em truncar a série de Taylor no segundo termo (aproximação de 1ª ordem), tal que:

$$y(x_{i+1}) = y(x_i) + hf[x_i, y(x_i)] \quad (32)$$

Ressalta-se que o incremento h , para o método de Euler, é fixo para todo o cálculo e depende de apenas um único ponto. Porém, face o presente problema, optou-se pelo método de Bogacki e Shampine (1989), que possui incremento adaptativo e se baseia no método de Runge-Kutta.

Considerando uma equação diferencial genérica a ser resolvida $y' = f(t, y)$, com y_n representando a solução numérica no instante t_n com incremento h_n , o qual é definido por $h_n = t_{n+1} - t_n$, a aproximação de terceira ordem é descrita por:

$$z_{n+1} = y_n + \frac{7}{24}hk_1 + \frac{1}{4}hk_2 + \frac{1}{3}hk_3 + \frac{1}{8}hk_4 \quad (33)$$

onde

$$k_1 = hf(t_i, y_i) \quad (34)$$

$$k_2 = f(t_n + \frac{1}{2}h_n, y_n + \frac{1}{2}hk_1) \quad (35)$$

$$k_3 = f(t_n + \frac{3}{4}h_n, y_n + \frac{3}{4}hk_1) \quad (36)$$

A aproximação de segunda ordem é dada por:

$$y_{n+1} = y_n + \frac{2}{9}hk_1 + \frac{1}{3}hk_2 + \frac{4}{9}hk_3 \quad (37)$$

Assim, a diferença entre z_{n+1} e y_{n+1} é usada para ajustar o incremento de tempo.

2.2.2 Algoritmo

O algoritmo utilizado para a construção do programa computacional é apresentado no fluxograma da Figura 21.

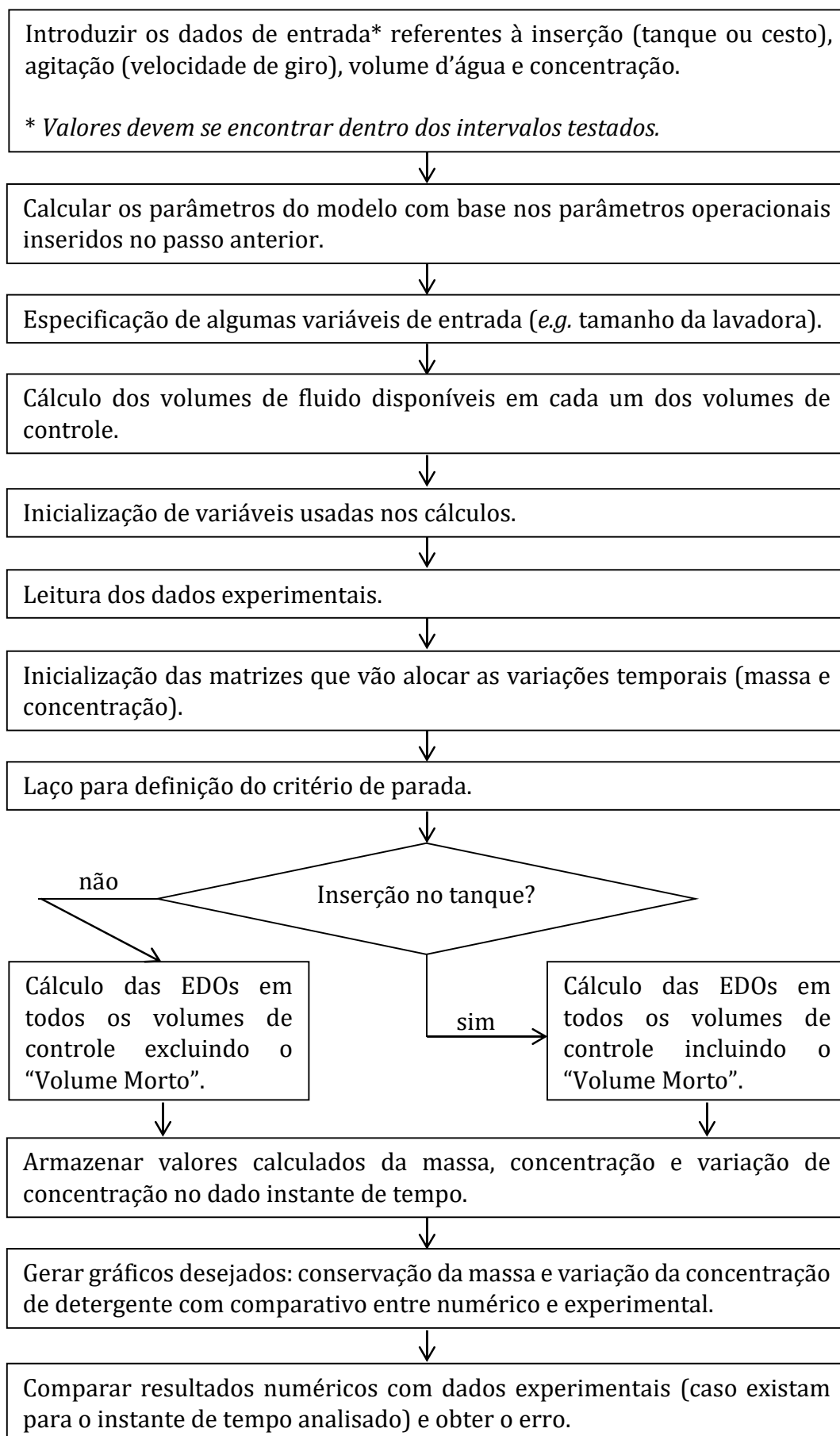


Figura 21 – Fluxograma representativo do algoritmo utilizado.

2.2.3 Equações de fechamento

As equações que serão utilizadas para efetuar os cálculos estão apresentadas de modo resumido na Tabela 1. As mesmas foram resolvidas utilizando o método apresentado no item 2.2.1. Salienta-se o fato de que, para o tanque, a equação (24) só deve ser resolvida se a inserção de detergente foi realizada nesse compartimento.

Tabela 1 – Equações de fechamento dos volumes de controle estudados.

Volume de Controle	Número(s) da Equação(ões)
Tanque	23 ou 24
Volume Morto	25
Cesto	26
Outros tecidos	27
Sonda	28, 29, 30

Os parâmetros empíricos a serem ajustados, cujos resultados são discutidos no Capítulo 4, são: \dot{V}_{T-C} (Eqs. 23, 24 e 26), \dot{V}_{C-N} (Eqs. 26 e 30), D_{ef} (Eqs. 28, 29 e 30), \dot{V}_{T-VM} (Eqs. 23 e 25) e X . Este último ainda não foi apresentado até então e, por isso, será aqui descrito. No modelo computacional foi utilizado um volume de controle o qual corresponde à região entre o fundo do cesto e o fundo do tanque. Considerou-se que a massa de detergente que decanta ficará nesta região e, durante o ciclo de lavagem, tenderá a se homogeneizar. Durante os testes do experimento fatorial (a ser descrito no capítulo 4), existiu um tempo de 15 segundos entre o término do enchimento e o início da agitação para se adicionar o detergente. Isto se fez necessário por questões de viabilidade de execução dos testes. Então, no referido intervalo, assumiu-se que um percentual da massa de detergente inserida decantou e, no instante zero do teste (início da agitação), encontrava-se no fundo do tanque.

Além desses, existiram outros parâmetros de ajuste, mas que foram mantidos fixos, são eles: α e \dot{V}_{C-O} . O primeiro foi adotado como sendo $3,5 \times 10^{-3}$ obtido através da razão da área da sonda em relação à área de todos os tecidos. Já para o segundo parâmetro, utilizou-se o valor de $1,5 \times 10^{-6}$, o qual foi adotado a partir de análises do modelo nas quais não havia a sonda.

3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Para a realização da vertente experimental do trabalho, necessitou-se primeiramente desenvolver uma metodologia de teste visto que não se encontrou um procedimento já existente tal como em normas. De todo modo, sempre que possível, as decisões foram embasadas em condições prescritas por algum procedimento normalizado. A intenção foi criar um procedimento capaz de capturar a variação da concentração de detergente em diferentes compartimentos da lavadora no decorrer do ciclo de lavagem. A partir de então, planejou-se uma bateria de experimentos que foram executados com equipamentos disponíveis.

Durante a etapa de desenvolvimento da metodologia experimental, optou-se por utilizar uma lavadora de uso doméstico em comercialização por efeito de simplicidade (*e.g.* os programas de lavagem estão prontos para o uso, não sendo necessário nenhum desenvolvimento). Trata-se de um modelo comercializado no mercado australiano, mostrada na Figura 22, a qual se assemelha a modelos também presentes no mercado brasileiro e norte-americano (principais mercados de lavadoras de eixo vertical). Foram utilizadas as configurações originais da máquina para os ensaios, isto é, perfil de agitação, quantidade de água e geometria dos componentes.



Figura 22 – Vista do interior da lavadora utilizada nos testes da metodologia (Fonte: Simpson, 2015).

3.1 MEDIÇÃO DA CONCENTRAÇÃO

A concentração de detergente foi medida de forma indireta por não haverem métodos disponíveis para a medição direta. Para tanto, duas técnicas foram analisadas: condutividade e absorbância. A primeira foi utilizada no trabalho de van den Brekel (1987), enquanto a segunda é um padrão da norma AHAM (2010).

3.1.1 Condutividade

Analisando a composição do detergente da norma AHAM (2010), o sódio está presente em diversos componentes de tal forma que constitui mais de 70% da massa. Tais componentes, ao se dissolverem na água, liberam íons, conforme explicado em EPA (2014). Portanto, a medição da condutividade é uma forma indireta de quantificar a presença do detergente. Esta propriedade é medida através do uso de condutivímetros cujo funcionamento é representado esquematicamente na Figura 23.

Existem diferentes configurações construtivas desses aparelhos. O aparelho utilizado possui 4 polos, o qual, segundo o fabricante, apresenta boa linearidade em um vasto intervalo de condutividade. Para quantificar a relação entre condutividade e concentração do detergente, realizou-se um experimento que será descrito no item 3.2.

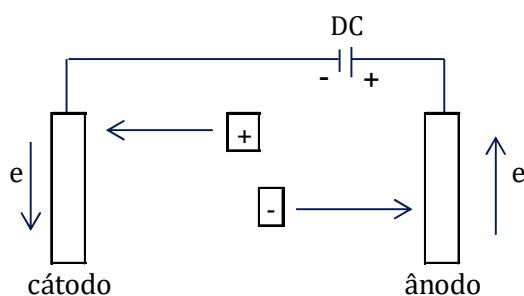


Figura 23 – Representação esquemática do funcionamento de um condutivímetro (Fonte: adaptado de Mettler Toledo, 2015).

3.1.2 Absorvância

A absorvância (ou absorvância) diz respeito, conforme Bruno (2014), à quantidade relativa de energia luminosa absorvida por uma solução. A relação da

absorbância e concentração se dá através da Lei de Lambert-Beer, a qual, segundo Basques (2010), é descrita como:

$$Abs = -\log_{10} \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad (38)$$

onde, *Abs* representa a absorbância, *I* é a intensidade da energia emergente e *I*₀ corresponde à intensidade da energia incidente. O mesmo autor esclarece que a absorbância é uma função de três itens: comprimento de onda utilizado (*a*), espessura da solução a ser atravessada (*l*) e a concentração da solução (*C*). Matematicamente, escreve-se:

$$Abs = -alC \quad (39)$$

Dessa forma, quanto maior for a concentração de uma determinada substância, maior será a absorbância da amostra. Para a medição dessa propriedade, utilizou-se um espectrofotômetro de luz ultravioleta (UV) cujo princípio de funcionamento é representado esquematicamente na Figura 24.

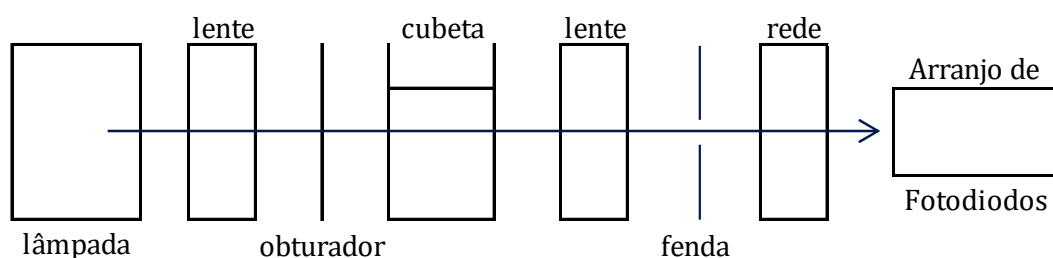


Figura 24 – Representação esquemática do funcionamento de um espectrofotômetro UV (Fonte: adaptado de Sousa, 2011).

A norma AHAM (2010) utiliza esse tipo de equipamento para a medição da concentração de detergente presente na água. Para tanto, existem procedimentos referentes ao tipo de cubeta a ser usada, bem como os comprimentos de onda a serem aplicados sobre a amostra. Da mesma forma como foi mencionado para a condutividade elétrica, também foram realizados testes correlacionando absorbância e concentração do detergente, apresentados no item 3.2.

3.2 AVALIAÇÃO DA MEDIÇÃO INDIRETA DA CONCENTRAÇÃO

Para as análises de relação entre absorbância e concentração, bem como entre condutividade e concentração, as condições de teste foram:

Medidor: Condutivímetro e Espectrofotômetro UV
 Misturador: Agitador magnético
 Rastreador: Detergente da norma AHAM

Sob tais condições, utilizou-se o seguinte procedimento:

1. Separar uma amostra de 0,5 litro de água com dureza e temperatura controladas (45 ppm de CaCO_3 e 20°C , respectivamente).
2. Adicionar uma quantidade pré-definida de detergente da norma AHAM, baseando-se na faixa de concentrações em análise (por exemplo, de 0 a 2 gramas por litro em intervalos de 0,25, por se tratar de uma faixa aplicada em normas).
3. Usar um agitador magnético para homogeneizar a mistura por 10 minutos numa velocidade de aproximadamente 600 rpm.
4. Coletar amostras de 20 ml para a leitura da absorbância e usar o próprio recipiente de 0,5 L para a medição da condutividade.

A primeira abordagem constituiu em usar água com dureza controlada. Notou-se que os comportamentos tanto da condutividade quanto da absorbância podem ser considerados lineares na faixa medida, conforme mostrado na Figura 25.

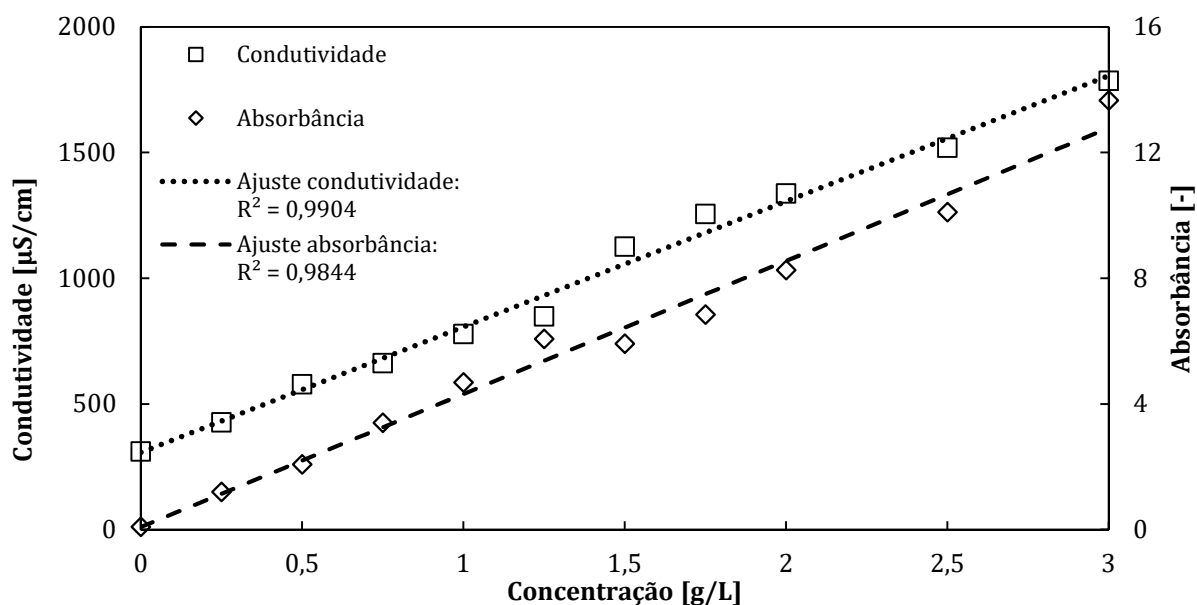


Figura 25 – Relação entre condutividade, absorbância e concentração (água com dureza controlada).

A partir das equações da reta que constam na Figura 25, criaram-se funções de transferência para obter as concentrações desconhecidas. Contudo, as respostas encontradas a partir das conversões não se mostraram tão consistentes. Isto se deve à sensibilidade da condutividade às variações da água e outros ruídos inerentes ao processo de medição.

O mesmo procedimento foi repetido, porém com água destilada. A Figura 26 mostra o resultado dessa segunda abordagem, onde se verificam valores de R^2 próximos aos obtidos com a água com dureza controlada.

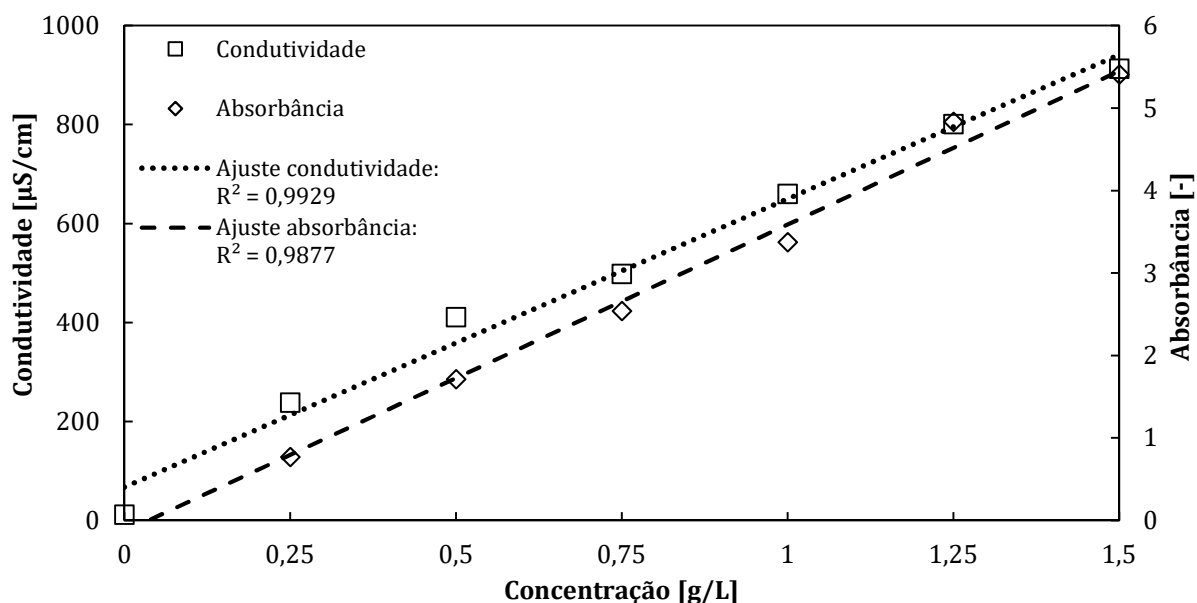


Figura 26 – Relação entre condutividade, absorvância e concentração (água destilada).

Para a realização desse trabalho, optou-se pela utilização da água com dureza controlada. Isto se deve ao fato de ser inviável a realização de testes com água destilada, tanto por questões financeiras quanto por questões de aplicabilidade, visto que em condições reais, não se utiliza água destilada para a lavagem de roupas. Além disso, o ajuste da correlação entre absorvância, condutividade e concentração utilizando água de dureza controlada foi satisfatório (R^2 elevado).

A solução adotada para minimizar os erros de conversão entre a propriedade medida e a concentração foi a criação de funções de transferência (ver Apêndice II) para cada teste. Os modelos e especificações dos aparelhos de medição utilizados encontram-se no Apêndice III.

3.3 PONTOS DE COLETA DAS AMOSTRAS

Inicialmente, foram avaliadas as variações de concentração em regiões distintas (cesto e tanque) e em diferentes alturas. Balizou-se como altura mínima 100 mm do fundo do cesto. Ainda, avaliou-se uma segunda (meio) e uma terceira altura (topo) a 200 e 300 mm do fundo do cesto, respectivamente. Essas alturas são mostradas na Figura 27.

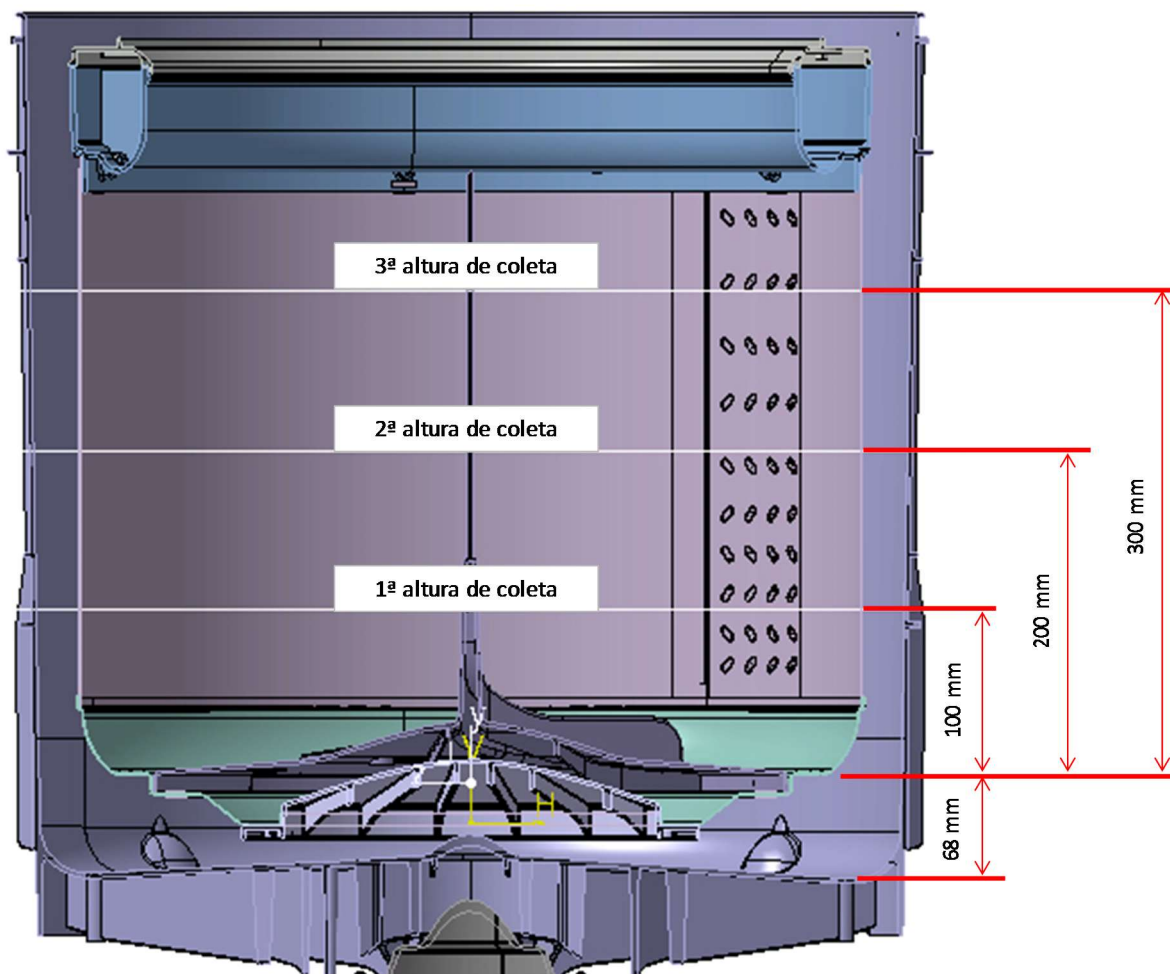


Figura 27 – Alturas de coletas para testes da metodologia experimental.

Para fazer a coleta do fluido, foram utilizados tubos de poliuretano termoplástico (TPU). Este tipo de material foi escolhido devido ao balanço entre flexibilidade e resistência mecânica. Para fazer a sucção do fluido, utilizaram-se seringas de 60 ml.

A Figura 28 mostra a montagem dos dutos no cesto da lavadora, o qual está em contato direto com as roupas. Além do cesto, foram inseridas mangueiras também no tanque, conforme mostrado na Figura 29 e no agitador, como ilustra a Figura 30. A Figura 31 resume a instrumentação para a coleta da mistura.

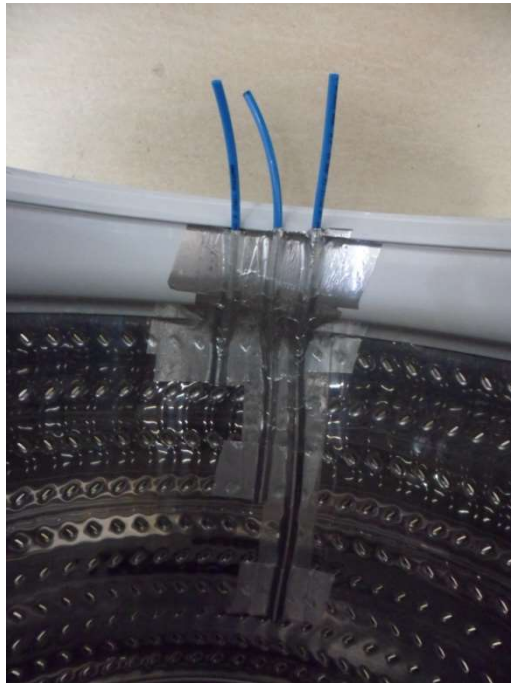


Figura 28 – Instrumentação do cesto da lavadora.



Figura 29 – Instrumentação do tanque da lavadora.



Figura 30 – Instrumentação do agitador.



Figura 31 – Conjunto dos compartimentos da lavadora.

Além dos compartimentos da máquina, aplicou-se a mesma técnica para coleta de amostras em sondas de tecido. Utilizaram-se fronhas de algodão (material usado em normas) dobradas e costuradas. No interior dessas amostras foi fixada uma mangueira com cola quente. Desse modo, consegue-se extrair uma amostra de líquido presente no

interior do tecido. Para tanto, é essencial que os tecidos estejam submersos no líquido contido no cesto e não na superfície. Este é um dos motivos do estudo ser voltado para máquinas que possuem agitadores altos como o mostrado na Figura 30. Lavadoras com esse tipo de dispositivo de ação mecânica necessitam de uma quantidade de água tal que as roupas estejam completamente imersas no fluido. Um exemplo disso é quando o consumidor coloca uma alta quantidade de roupas e as mesmas preenchem toda a altura do cesto, inclusive a parte superior. Todavia, a região de maior ação mecânica (uma das responsáveis pela extração de sujeira) é a base do agitador. Sendo assim, faz-se necessário que as peças inicialmente no topo cheguem ao fundo do cesto. Se a quantidade de água disponível, dentre outros fatores, for baixa, a movimentação dos tecidos entre as regiões não ocorre.

A Figura 32 mostra uma primeira sonda, na qual o tecido foi dobrado duas vezes e o duto está na camada mais interior. Já a Figura 33 apresenta uma segunda sonda, na qual o tecido foi dobrado quatro vezes com o duto também no meio do tecido dobrado. Para fixar a mangueira no algodão foram testados dois materiais: resina (à base de poliálcool-poliéster-poliéster) e cola quente. Esta última se mostrou superior pelo fácil manuseio e melhor flexibilidade em relação à resina. A cola quente também foi usada para fechar as últimas dobras da sonda pequena (Figura 33).



Figura 32 – Sonda de tecido grande (dobrado duas vezes) com duto no interior.



Figura 33 – Sonda de tecido pequena (dobrado quatro vezes) com duto no interior.

3.4 INTERVALO DE COLETA

As coletas foram realizadas em intervalos de tempo pré-definidos, de tal forma que as amostras eram obtidas através da sucção, com o uso da seringa, e em seguida eram dispensadas em um recipiente para posterior análise. Este processo foi repetido até o término do ciclo de lavagem.

Para cada local analisado, fez-se necessário ter um operador, principalmente para as coletas realizadas no tanque e no cesto. Isto porque, para esses locais, os primeiros minutos correspondem ao transiente do processo de transferência de massa. Sendo assim, para captar esse processo de maneira mais precisa, são necessários pequenos intervalos de coleta. Com a metodologia empregada, foi possível realizar coletas em intervalos de 15 segundos, cujo limitante é o seu próprio processo. A partir do atingimento do equilíbrio da concentração entre tanque e cesto, os intervalos foram espaçados com o objetivo de otimizar a quantidade de amostras, visto que a etapa de leitura das amostras era bastante trabalhosa.

No caso das sondas, o espaçamento entre as coletas nos instantes iniciais foi maior, pois a transferência de massa ocorre predominantemente por difusão (principalmente no caso da sonda pequena – Figura 33), sendo este um processo mais lento em relação à advecção. Além disso, pelo fato das sondas terem liberdade de movimentação, as coletas nestas demandavam maior tempo e cuidado, pois precisam estar submersas para possibilitar a captura do fluido de seu interior.

3.5 EFEITO DA DECANTAÇÃO E HOMOGENEIZAÇÃO

Outra análise necessária no desenvolvimento da metodologia experimental consistiu em averiguar a influência da decantação e homogeneização das amostras. Para esta investigação, as condições de teste foram:

Medidor:	Espectrofotômetro UV
Misturador:	Agitador magnético
Rastreador:	Detergente da norma AHAM

O procedimento adotado nos ensaios seguiu a sequência:

1. Separar uma amostra de 1 litro da água de interesse (dureza e temperatura controladas ou não).
2. Adicionar uma quantidade pré-definida de detergente baseando-se na concentração a ser estudada.
3. Homogeneizar a mistura por 10 minutos numa velocidade de aproximadamente 600 rpm.
4. Coletar amostras de 20 ml para a leitura da absorbância.
5. Repetir o passo 4 conforme o plano de testes até atingir o tempo final previamente estipulado:
 - a. Para as amostras coletadas num intervalo de até 3 horas, as medições foram feitas logo após a coleta (sem homogeneizar);
 - b. Após 3 horas, foram coletadas 2 amostras: a primeira sem homogeneizar; já a segunda passou por nova homogeneização, tal como descrito no passo 3.

O resultado dessa análise é mostrado na Figura 34, na qual se nota que nas primeiras 3 horas existe um aumento de aproximadamente 30 mg/L. Isto provavelmente se deve a efeitos difusivos do detergente na amostra coletada. Porém, a partir de então esse acréscimo torna-se bem mais suave (aproximadamente 20 mg/L num intervalo de 40 horas). Nota-se também que as amostras homogeneizadas apresentaram resultados muito próximos àquelas que não sofreram modificação.

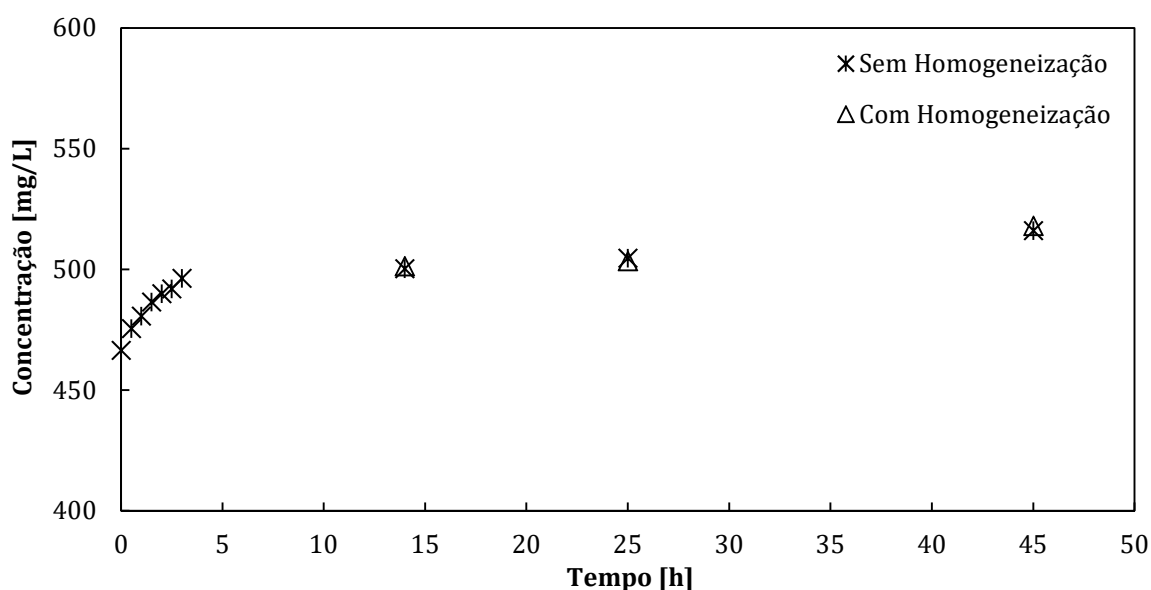


Figura 34 – Influência da decantação e homogeneização nas leituras das amostras coletadas para a concentração de 0,5 g/L para água de dureza e temperatura controladas.

Resumidamente, a homogeneização não mostrou ser significativa e, conseqüentemente, não foi utilizada em outras leituras. Em contrapartida, notou-se que a decantação alterou o valor das leituras. Foram feitas medições com as concentrações de 0,5 e 1,0 g/L e as variações observadas entre a primeira e a última medição foram de aproximadamente 10 e 5%, respectivamente. Portanto, será considerada uma incerteza de 5% (Apêndice IV) referente à etapa de leitura, pois em grande parte dos casos não foi viável fazer as medições nos instantes subsequentes dos testes, principalmente devido ao seu tempo total.

3.6 TESTES ENVOLVENDO ÁGUA E DETERGENTE NA LAVADORA

Para todas as investigações envolvendo água e detergente na lavadora, as configurações de ensaio foram:

Água:	Abrandada
Lavadora:	Simpson SWT7542
Medidor:	Condutivímetro
Nível d'água:	Cheio (em torno de 100 litros)
Programa:	Regular (padrão da máquina)
Rastreador:	100 gramas de detergente da norma AHAM

Já a sequência adotada para esse grupo de ensaios foi:

1. Entrada de água na lavadora até o nível estipulado.
2. Inserção do detergente.
3. Início da agitação e coletas.
4. Após término, limpeza do cesto com mangueira externa.
5. Leitura das amostras coletadas e compilação dos resultados.

Os valores da condutividade elétrica a serem apresentados nos próximos itens correspondem à leitura de cada amostra subtraindo o valor de referência. Este é o valor da condutividade da água utilizada para o teste, que pode variar conforme a qualidade da água abrandada e a sua temperatura. A quantidade de água pode variar, pois é uma função do sensor de nível da máquina testada, o qual possui um erro de leitura de ± 6 litros. O instante zero de medição refere-se a 5 minutos após ter sido colocado o detergente no respectivo compartimento. Isto foi feito com a intenção de permitir que o detergente se difundia no meio. Após este tempo, iniciou-se a agitação.

Foram testadas quatro condições:

- A. Inserindo todo o detergente no fundo do cesto antes da entrada d'água.
- B. Inserindo todo o detergente no topo do cesto depois da entrada d'água.
- C. Inserindo todo o detergente no topo do tanque depois da entrada d'água.
- D. Inserindo quantidades de detergente proporcionais ao volume d'água que permanece no tanque e no cesto.

O objetivo desses ensaios foi definir uma série de parâmetros de teste, ou seja, o intervalo de coleta, os compartimentos e as suas alturas que teriam amostras coletadas. Os resultados desses testes são apresentados a seguir.

3.6.1 Primeira série

Nesta primeira série foram coletadas amostras de todos os compartimentos (tanque, cesto e agitador) e alturas (definidas na Figura 27) a cada 5 minutos. A razão do intervalo ter sido longo se deve à quantidade de amostras. Para conseguir fazer a coleta no agitador, parava-se o ciclo por um período curto de tempo (aproximadamente 10 segundos).

Para todas as configurações, observou-se que:

- As respostas a partir de 5 minutos foram semelhantes, ou seja, o sistema entrou em equilíbrio. Sendo assim, constatou-se a necessidade de se reduzir o intervalo de coleta para observar mais nitidamente o processo de transferência de massa.
- Os valores obtidos no cesto e agitador foram semelhantes.

As observações particulares de cada condição foram:

- A. A primeira leitura do fundo do tanque foi aproximadamente o dobro das demais (ver Figura 35). Isto indica que o detergente deve ter sido conduzido do fundo do cesto para o fundo do tanque durante o enchimento d'água.

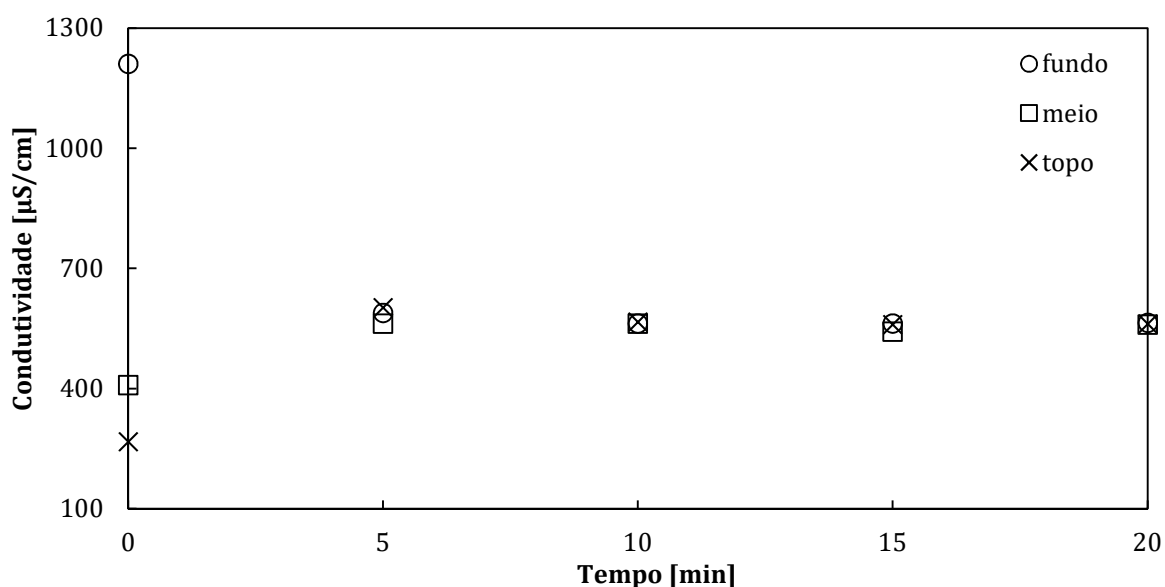


Figura 35 – Variação da condutividade no tanque para condição A.

- B. A primeira leitura do fundo do cesto foi aproximadamente 50% maior do que as demais (ver Figura 36), tal que, provavelmente ocorreu decantação do detergente antes do início da agitação.
- C. Não foi notado qualquer comportamento discrepante (ver Figura 37). Caso tenha ocorrido decantação, a altura de coleta inferior do tanque estava posicionada a 170 mm do seu fundo, o que seria afastado demais para captar concentrações mais elevadas no primeiro ponto de coleta.

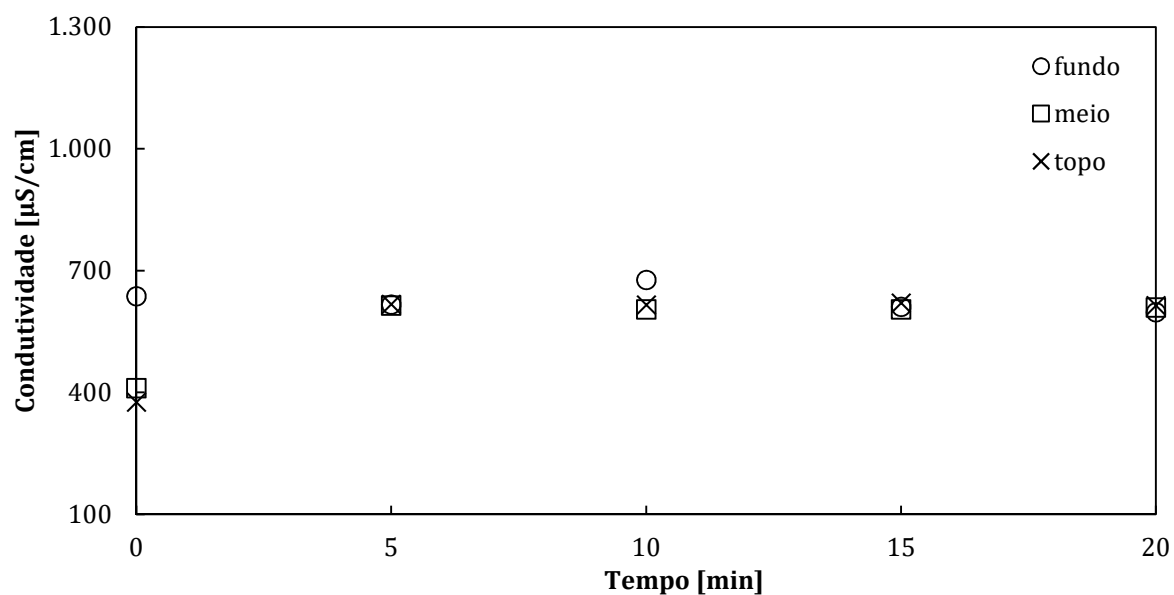


Figura 36 – Variação da condutividade no cesto para condição B.

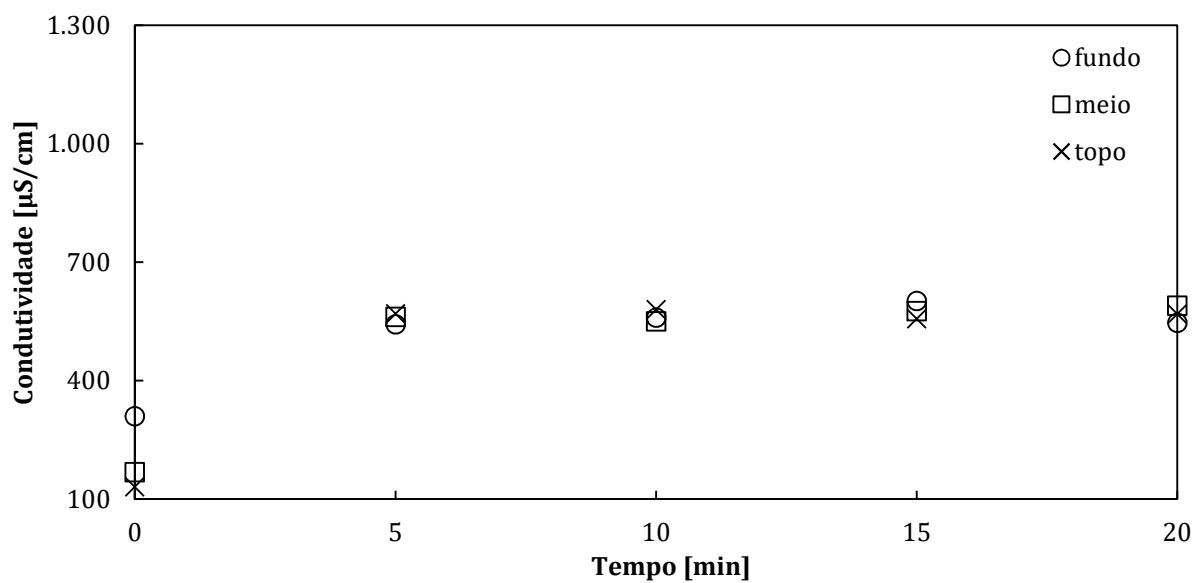


Figura 37 – Variação da condutividade no tanque para condição C.

D. Conforme esperado, devido ao fato de inserir massas de detergente proporcionais ao volume d'água, as repostas tanto no tanque quanto no cesto foram próximas. Na Figura 38 estão destacadas as leituras da altura inferior dos compartimentos citados.

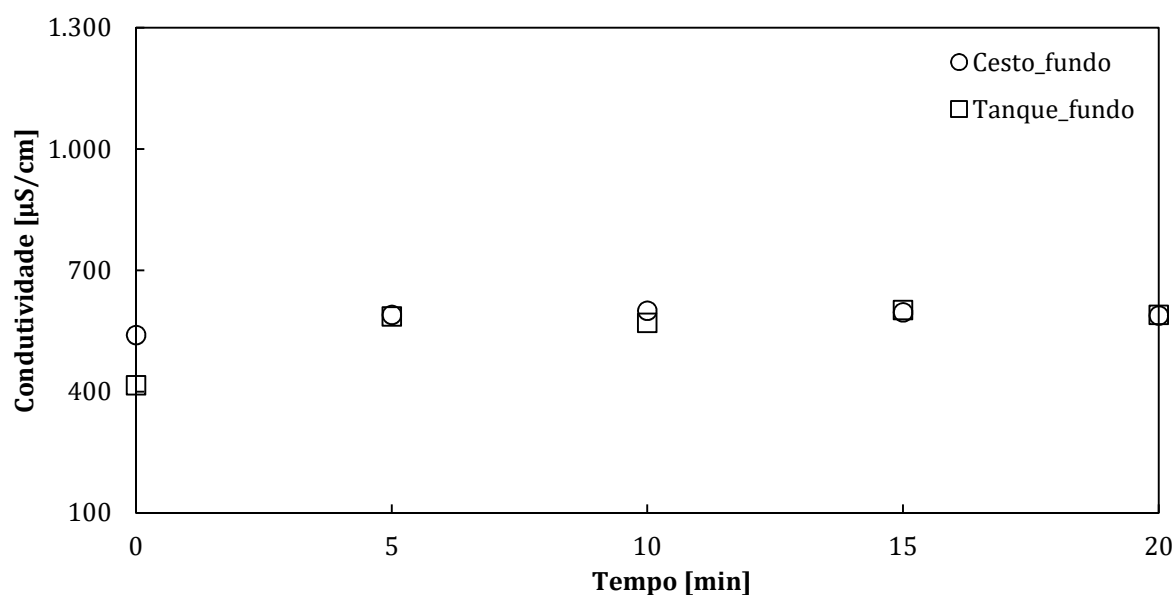


Figura 38 – Variação da condutividade no tanque e cesto para condição D.

A partir dos resultados obtidos na primeira série, executou-se uma segunda sequência de testes a ser descrita a seguir.

3.6.2 Segunda série

As quatro condições (A-D) foram novamente testadas, agora num período de 10 minutos, medindo-se apenas na altura média do cesto e do tanque. O intervalo de medição foi de 30 segundos. Como não foram coletadas amostras do agitador (devido à semelhança das respostas do cesto, citada na primeira série), a máquina esteve operante em toda a medição.

As observações para todos os casos dessa segunda bateria são:

- O equilíbrio entre o tanque e o cesto é obtido rapidamente (menos de 3 minutos) conforme mostrado na Figura 39.
- O gradiente entre tanque e cesto, principalmente no primeiro minuto, não pode ser visualizado claramente quando as coletas foram realizadas na altura intermediária.

Nota-se ainda que a inserção do detergente para a opção B é no cesto, local aonde o agitador se encontra, e devido a isto, o regime permanente é atingido antes em relação à opção C, na qual a adição é realizada no tanque.

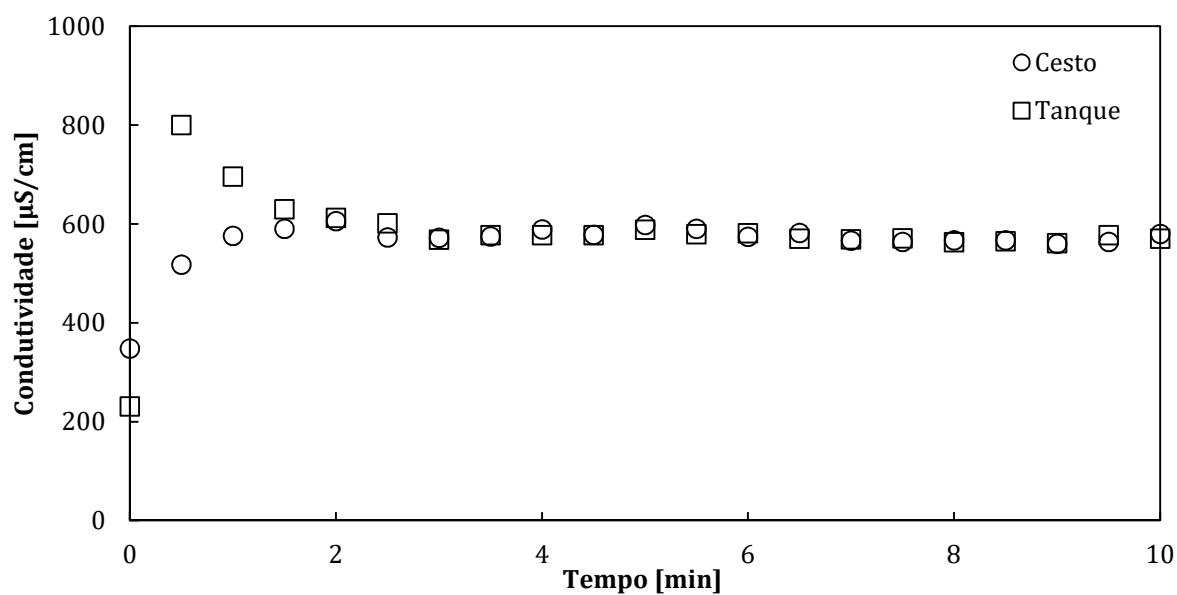


Figura 39 – Variação da condutividade no cesto e tanque para configuração A da segunda série.

3.6.3 Terceira série

O foco da terceira série esteve voltado à determinação da altura da coleta das amostras, sendo realizada na região inferior. Além de confirmar as conclusões das outras baterias (como a decantação na configuração C), a terceira série descreve com maior nitidez o processo de transferência de massa, como mostra a Figura 40.

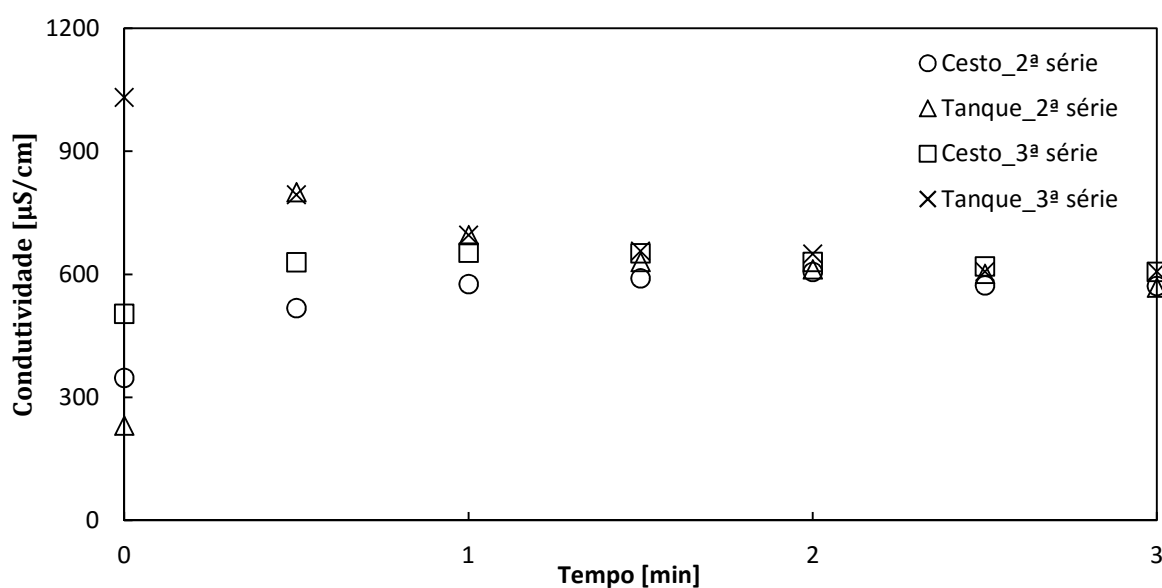


Figura 40 – Comparativo entre respostas do tanque e cesto da segunda e terceira séries.

Assim, optou-se por utilizar a altura inferior para os testes subsequentes.

3.7 TESTES COM ÁGUA, DETERGENTE E TECIDOS NA LAVADORA

Em relação aos testes descritos no item anterior, as condições de teste se alteraram ligeiramente, sendo definidas por:

Medidor: Condutivímetro e/ou Espectrofotômetro UV

Tecido: Fronhas de algodão de 800 mm² da norma IEC após vida útil

Nesta etapa, houve também a presença de tecidos, seguindo o seguinte procedimento:

1. Adição da sonda de tecido no fundo do cesto.
2. Inserção dos tecidos restantes (resto da carga).
3. Entrada de água na lavadora até o nível estipulado.
4. Inserção do detergente.
5. Início da agitação e coletas.
6. Após término, limpeza do cesto com mangueira externa.
7. Leitura das amostras coletadas e compilação dos resultados.

Foram testadas duas configurações nas quais a diferença está na inserção do detergente na lavadora:

- I. No topo do cesto.
- II. No topo do tanque.

Para ambas as opções listadas, foram utilizadas as duas sondas de tecido (mostradas na Figura 32 e Figura 33) e a variável resposta foi a condutividade elétrica.

O resultado da configuração I é mostrado na Figura 41 e as constatações foram:

- O equilíbrio entre o tanque e cesto foi atingido em menos de 3 minutos. Este foi o motivo pelo qual o intervalo de coleta nesses compartimentos foi aumentado a partir desse instante.
- As sondas apresentaram comportamentos diferentes entre si. A obtenção do equilíbrio foi mais rápida na maior, o que se explica pelo menor número

de camadas de tecido que o detergente precisa atravessar para chegar ao ponto de sucção (meio da sonda).

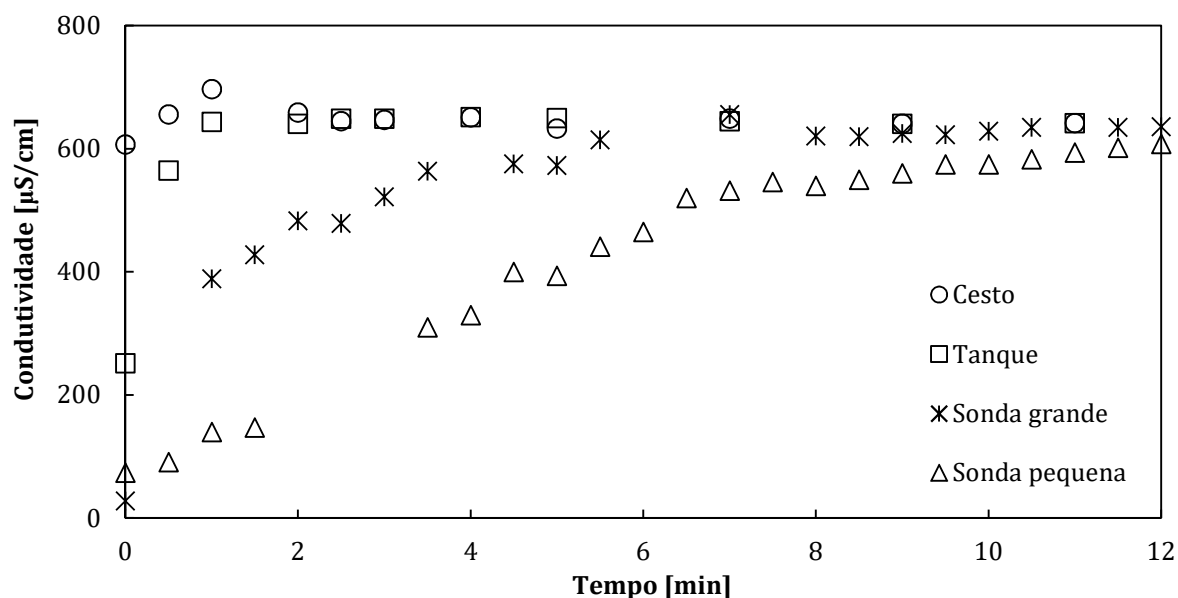


Figura 41 – Variação da condutividade para a configuração I.

A configuração II levou a conclusões semelhantes às da configuração I e, dessa forma, não serão feitos maiores comentários a respeito dela.

Adicionalmente, fez-se uma investigação cujo objetivo era o de comparar as respostas obtidas através da condutividade e absorbância de uma mesma amostra. Os resultados são mostrados na Figura 42, na qual se destaca que as tendências entre essas duas propriedades semelhantes. Assim, tanto a absorbância quanto a condutividade podem vir a ser utilizadas para caracterizar a concentração.

Além das considerações já feitas, é importante frisar a relevância da limpeza rigorosa das sondas antes do início de cada teste para evitar que o detergente remanescente influencie nas respostas da condição em análise.

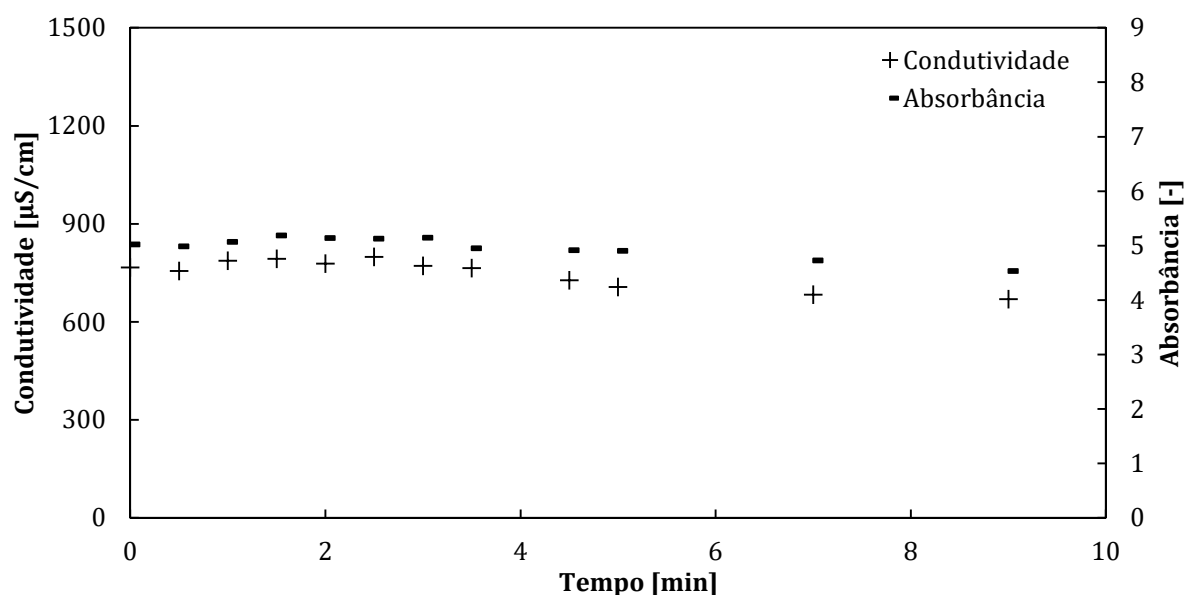


Figura 42 – Comparativo das respostas de condutividade e absorvância da sonda pequena.

3.8 TESTES COM ÁGUA E DETERGENTE SEM AGITAÇÃO

Adicionalmente, foram realizados dois testes nos quais não houve agitação mecânica. Assim, o processo de transferência de massa se dá apenas pela difusão. As condições de teste foram as mesmas descrita para o item 3.6, salvo:

- pelo programa de lavagem que, no presente caso, não foi ativado.
- pela inclusão dos mesmos tecidos apresentados no item 3.7 para o segundo teste.

Para esses casos, a ordem adotada foi:

0. (Para o caso em que a mistura continha tecidos) Inserção dos tecidos, deixando a sonda grande na altura média.
1. Entrada de água na lavadora até o nível estipulado.
2. Inserção do detergente no cesto.
3. Início das coletas.
4. Após término, limpeza do cesto com mangueira externa (para o caso em que a mistura continha tecidos também foi feito um ciclo completo de lavagem dos mesmos).
5. Leitura das amostras coletadas e compilação dos resultados.

O primeiro teste foi realizado sem tecido, ou seja, apenas com água e detergente. A Figura 43 mostra o instante subsequente à inserção do detergente no topo do cesto. Já na Figura 44 é apresentado o mesmo conjunto após nove horas sem agitação.

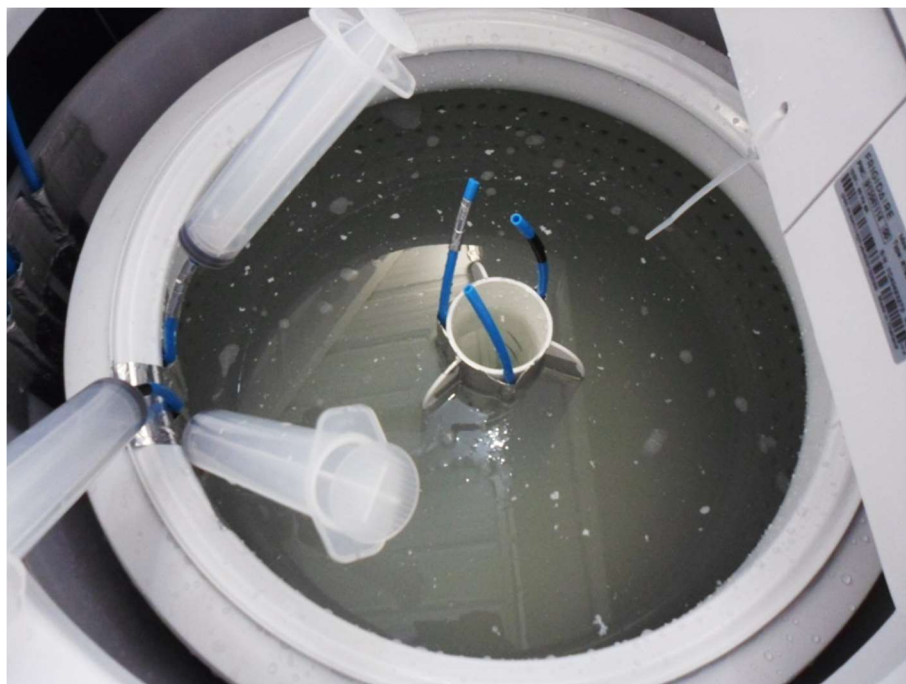


Figura 43 – Cesto da lavadora logo após a inserção do detergente (sem agitação).



Figura 44 – Cesto da lavadora após 9 horas da inserção do detergente (sem agitação).

Analizando-se as imagens percebe-se que, após várias horas, a água está menos turva, não há flocos de detergente na superfície e o fundo do cesto (base do agitador) está com uma camada branca, ou seja, indícios de que o detergente inserido no topo do cesto decantou e não se dissolveu.

Complementarmente, foram coletadas amostras nas três alturas do cesto e mediu-se a condutividade das mesmas, mostradas na Figura 45. O intervalo de coleta variou durante os testes desta seção. Nos dez primeiros minutos, o intervalo de coleta foi de dois minutos. A partir de então, as coletas foram realizadas de hora em hora até completar nove horas. A última medida foi feita vinte e quatro horas após o início.

Examinando-se os pontos da Figura 45, observa-se que, apesar da água e do detergente terem ficado por diversas horas em contato, não houve homogeneização. Nota-se que os valores de condutividade medidos no fundo, permanecem durante todo o intervalo de tempo consideravelmente maiores do que as demais regiões (aproximadamente o dobro). Grande parte do detergente inserido decantou e permaneceu no fundo do cesto conforme visualizado na Figura 44.

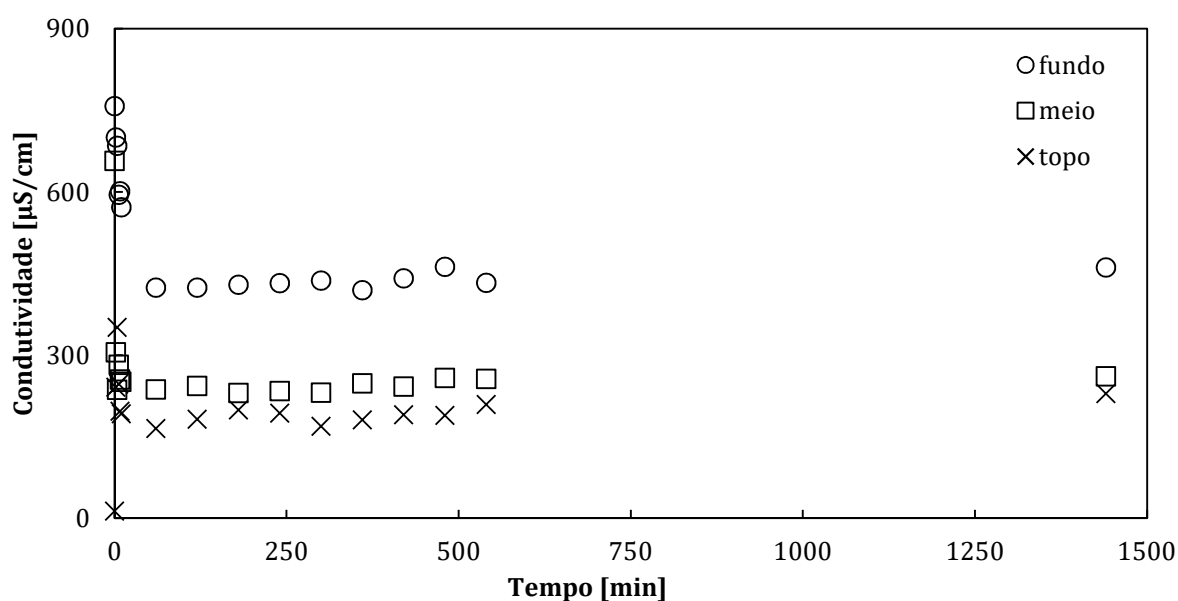


Figura 45 – Variação da condutividade para condição sem agitação e sem tecidos: coletas realizadas no cesto.

No segundo teste, adicionaram-se tecidos à água para, após isto, inserir o detergente. O comportamento observado foi diferente em relação ao primeiro teste e o resultado é apresentado na Figura 46. Destaca-se que, nesta abordagem, foi utilizada a sonda grande (Figura 32), da qual também foram extraídas amostras.

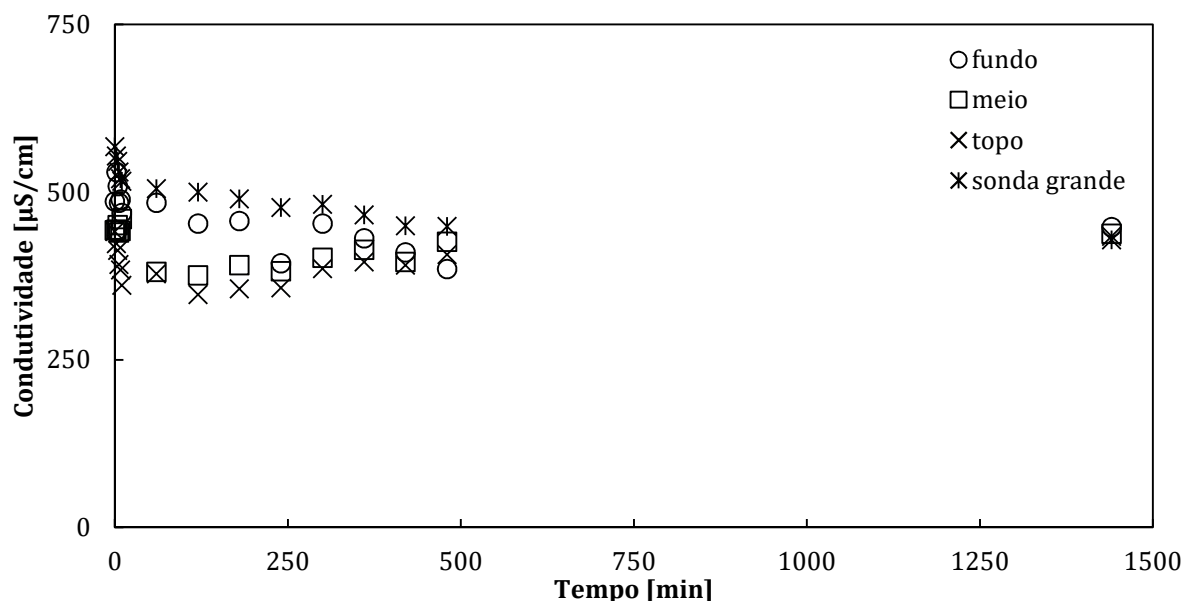


Figura 46 – Variação da condutividade para condição sem agitação e com tecidos: coletas realizadas no cesto.

Para o caso com tecidos (Figura 46), a resposta do sistema foi bem diferente em relação ao primeiro teste. Desde o começo, os valores de concentração estão mais próximos e, nitidamente, com o passar do tempo, tendem ao equilíbrio conforme se observa após 24 horas. Provavelmente isso se dá, pois, ao se inserir o detergente no topo do cesto, as roupas presentes agem como barreiras à decantação deste insumo.

As conclusões da presente investigação foram:

- Para o caso onde há apenas água e detergente, a difusão não foi significativa o suficiente para superar o efeito da decantação.
- Na condição com tecidos, os mesmos parecem contribuir para a homogeneização da mistura.

3.9 EXPERIMENTO FATORIAL

Após a realização de testes em condições simplificadas, foi realizado um experimento fatorial com a finalidade de entender não só os efeitos individuais dos parâmetros sobre o processo de lavagem, mas também as suas interações. Segundo Wu e Hamada (2009), planejar um experimento fatorial, ao invés de um fator por vez, é a maneira mais eficiente de determinar a influência de dois ou mais fatores sobre a variável

resposta. O objetivo foi verificar quais fatores são mais significativos para a transferência de massa, bem como criar uma base de dados experimentais para calibrar e validar o modelo.

Como fatores, foram elencados os seguintes parâmetros:

1. Local de inserção do detergente

- Em lavadoras atualmente comercializadas no mercado brasileiro existem opções que inserem o detergente diretamente no cesto e outras no tanque.

2. Agitação

- É usual encontrar diferentes programas de lavagem com diferentes características, dentre elas, a intensidade de agitação mecânica. Por exemplo, num programa “Delicado” os golpes são mais suaves, já em programas de “Lavagem Pesada” a transferência de quantidade de movimento é maior.

3. Volume de água

- A quantidade de água utilizada durante a lavagem tem impacto ambiental envolvido. Além disso, buscou-se variar a fração (kg de tecido/L de água) de tecidos e não a massa de tecidos propriamente dita.

4. Concentração inserida

- A quantidade de detergente utilizada é algo que está fora do controle do fabricante de lavadoras. Os consumidores podem vir a utilizar uma quantidade maior ou menor em relação à recomendação das normas.

O passo seguinte foi a definição dos valores de mínimos e máximos de cada fator. Para tanto, utilizaram-se valores atualmente aplicados em lavadoras de eixo vertical. Um resumo dos parâmetros escolhidos e dos níveis máximos (+) e mínimos (-) é apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Fatores e níveis utilizados no experimento fatorial.

	Inserção	Agitação	Volume [L]	Concentração [g/L]
-	Tanque	Suave	70	0,75
+	Cesto	Forte	90	1,25

Optou-se por fazer o experimento completo (4 fatores com 2 níveis, resultando em 16 configurações) para evitar confusão entre interações de alta ordem, fato este que pode ocorrer em experimentos fracionados. Sob o enfoque estatístico, seria de grande valia ter várias repetições de todas as configurações. Todavia, isso se torna inviável devido, principalmente, ao tempo necessário para tanto.

Outra decisão tomada que merece destaque é a opção de medir apenas a absorbância nos experimentos fatoriais. Durante a elaboração da metodologia, verificou-se que essa propriedade apresentou resultados equivalentes com a condutividade elétrica (seção 3.7). Porém, a adoção da absorbância é vantajosa pelo fato desta ser independente da temperatura d'água o que não ocorre com a condutividade, pois pequenas variações da temperatura do líquido são comuns de ocorrer. Em contrapartida, o esforço necessário para a leitura da absorbância das amostras é maior, principalmente daquelas com concentrações mais elevadas. Nestes casos, faz-se necessário diluir a amostra para permanecer dentro da faixa de leitura do espectrofotômetro utilizado.

Baseando-se nas considerações expostas, criou-se um plano de testes para o experimento fatorial que é apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Plano de testes do experimento fatorial.

Teste	Tratamento	Inserção detergente		Agitação		Volume [L]		Concentração [g/L]	
1	----	-1	tanque	-1	suave	-1	70	-1	0,75
2	+---	1	cesto	-1	suave	-1	70	-1	0,75
3	-+-	-1	tanque	1	forte	-1	70	-1	0,75
4	++-	1	cesto	1	forte	-1	70	-1	0,75
5	--+	-1	tanque	-1	suave	1	90	-1	0,75
6	+-+	1	cesto	-1	suave	1	90	-1	0,75
7	+++	-1	tanque	1	forte	1	90	-1	0,75
8	++++	1	cesto	1	forte	1	90	-1	0,75
9	----+	-1	tanque	-1	suave	-1	70	1	1,25
10	+++	1	cesto	-1	suave	-1	70	1	1,25
11	---+	-1	tanque	1	forte	-1	70	1	1,25
12	++	1	cesto	1	forte	-1	70	1	1,25
13	--	-1	tanque	-1	suave	1	90	1	1,25
14	++	1	cesto	-1	suave	1	90	1	1,25
15	---	-1	tanque	1	forte	1	90	1	1,25
16	+++	1	cesto	1	forte	1	90	1	1,25

3.9.1 Condições para a realização dos testes

As seguintes alterações foram implementadas em relação às condições de testes utilizadas durante o desenvolvimento da metodologia a fim de aumentar o controle sobre o sistema:

Agitador:	Estrutura modular com pás verticais e horizontais de 30 mm de altura (ver Figura 47)
Água:	Dureza controlada (~ 45 ppm de CaCO_3) Temperatura controlada ($\sim 20^\circ\text{C}$)
Lavadora:	RCP - <i>Rapid Control Prototype</i> (maiores detalhes na seção 3.9.3)
Medidor:	Espectrofotômetro UV
Rastreador:	Detergente da norma AHAM
Sonda:	Fronha dobrada quatro vezes (Figura 33)
Tecido:	4 kg de fronhas de algodão de 800 mm^2 da norma IEC dentro da vida útil

Destaca-se o fato da posição das mangueiras ter sido alterada em relação aos testes da metodologia. Isto foi realizado almejando-se captar com mais facilidade eventuais decantações. Assim, os dutos foram posicionados a, aproximadamente, cinco centímetros do fundo do cesto conforme mostrado na Figura 48.



Figura 47 – Agitador com estrutura montável utilizado nos experimentos fatoriais.

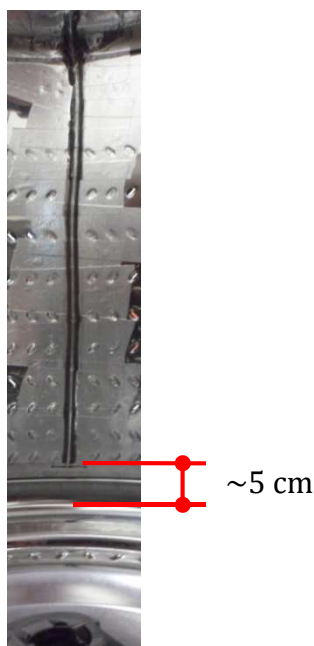


Figura 48 – Altura da mangueira utilizada nos testes do experimento fatorial.

3.9.2 Sequência adotada no experimento fatorial

Durante a realização do experimento fatorial, uma longa sequência de etapas foi necessária para evitar erros experimentais, os quais reduziriam a confiabilidade dos resultados. Mostra-se abaixo o passo-a-passo adotado:

1. Ligar o Espectrofotômetro UV e fazer sua regulagem padrão de inicialização.
2. Separar 4 L da água a ser usada (utilizada para fazer as curvas da função de transferência – Apêndice II – e diluição de amostras para leitura no espectrofotômetro).
3. Separar os materiais utilizados na execução dos testes (tecidos, seringas, recipientes para colocar amostras, bandejas, cronômetro).
4. Remover o cesto da máquina e verificar se existe resíduo de detergente no fundo do tanque.
5. Medir a quantidade de detergente a ser utilizado no teste (conforme plano de testes – Tabela 3).
6. Ligar computador e bancada de testes (*RCP*).
7. Selecionar a configuração a ser testada e iniciar aquisição dos dados de cada teste.

8. Posicionar a câmera para filmar o teste (manter o registro e, caso preciso, reanalisar).
9. Colocar a carga (tecidos) dentro da lavadora posicionando a sonda no fundo do cesto.
10. Iniciar o ciclo de lavagem, o qual se inicia com o enchimento.
11. Iniciar filmagem.
12. Ao término do enchimento, colocar o detergente no compartimento desejado conforme plano de testes (Tabela 3).
13. Iniciar as coletas ao começar a agitação e captar amostras durante o ciclo de acordo com os intervalos pré-estipulados.
14. No término do ciclo, retirar as fronhas e inserir numa lavadora comercial, executar dois ciclos completos de lavagem para retirar resíduo de detergente dos tecidos.
15. Fazer um ciclo de limpeza na bancada para diminuir o risco de resquícios de detergente do teste anterior.
16. Fazer as curvas de transferência para absorvância (0, 0,5, 1, 1,5, 2 g/L):
 - a. Separar 4 béqueres de 0,5 L para cada uma das concentrações a ser medida.
 - b. Homogeneizar, através do agitador magnético, por 5 minutos numa velocidade de aproximadamente 600 rpm.
 - c. Preencher planilha com resultados e analisar função de transferência obtida. Esta deve ser aproximada por uma reta com coeficiente de determinação (R^2) o mais próximo de 1, de tal forma a atingir erros menores que 5% para cada concentração.
17. Iniciar as leituras da absorvância das amostras no espectrofotômetro.
18. Após duas lavagens da carga, a sonda de tecido deve ser separada e torcida até garantir que não haja resíduo de detergente. Isto foi feito medindo a absorvância da água presente em seu interior. Estipulou-se como aceitável uma concentração de no máximo 0,1 g/L. Caso contrário, deve-se enxaguar e torcer a sonda novamente.
19. Secar os tecidos.
20. Terminar de ler as amostras e inserir na planilha de aquisição dos resultados.
21. Fazer uma análise preliminar para verificar se as leituras foram coerentes.

3.9.3 Bancada de testes utilizada no experimento fatorial

A lavadora utilizada nos testes do experimento fatorial é a *Rapid Control Prototype* (em português, Protótipo de Controle Rápido) ou *RCP*. Esta é chamada de protótipo por não ser um produto de uso comercial. Trata-se de uma bancada (ver Figura 49), baseada num produto já existente, na qual é possível coletar diversas informações bem como criar rotinas de lavagem sem a necessidade de conhecer a linguagem de programação inserida na máquina. Isto se deve à interface com linguagem de alto nível e fácil uso.

Especificamente para este trabalho, seu uso foi importante para a criação dos golpes fracos e fortes, bem como no controle da quantidade de água inserida. Também pelo fato de ser uma bancada, e não uma lavadora comercial, consegue-se facilmente inserir o detergente no compartimento desejado (tanque ou cesto).

A estrutura utilizada tem dimensões compatíveis às lavadoras das principais regiões do globo nas quais são usadas lavadoras de eixo vertical.

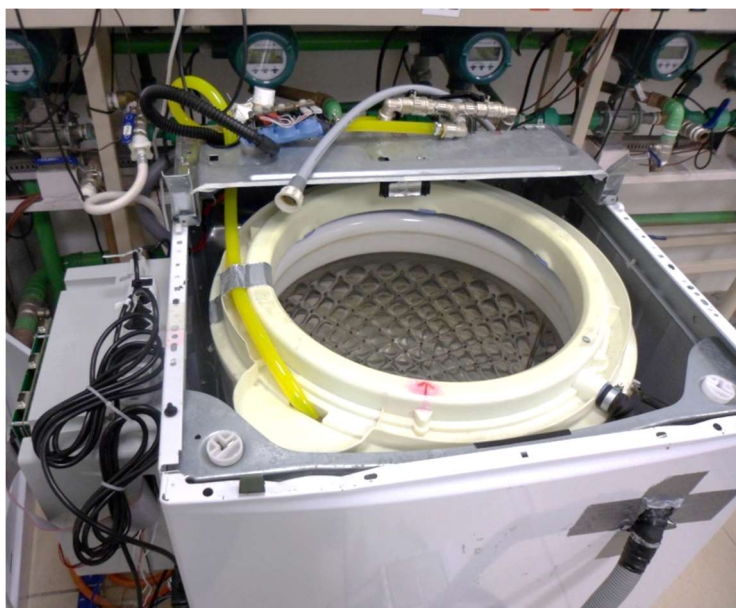


Figura 49 – RCP ou *Rapid Control Prototype*: bancada usada nos experimentos fatoriais.

3.9.4 Repetições

Antes de iniciar os testes fatoriais, optou-se por testar duas vezes as combinações máximas e mínimas para verificar o grau de repetitividade do experimento. A partir dessas repetições, constatou-se que:

1. A sonda grande não apresentou boa repetitividade e, por isso, optou-se por utilizar apenas a sonda pequena no decorrer do experimento fatorial. Isso pode ter ocorrido devido ao fato da movimentação da sonda maior ser mais aleatória do que a da pequena, o que interfere no fluxo de detergente que passa no interior do tecido.
2. O rigor na obtenção da função de transferência (relação entre a concentração e a absorbância) é fundamental para a minimização do erro experimental. Todas as funções utilizadas no experimento fatorial se encontram no Apêndice II.
3. Através dos valores obtidos, estimou-se a incerteza operacional, ou seja, da etapa de medição (Apêndice IV).

3.10 SÍNTESE DA METODOLOGIA EXPERIMENTAL

A partir dos resultados obtidos nos testes realizados, pôde-se concluir que:

1. Tanto a condutividade quanto a absorbância possuem relações lineares (função de transferência) com a concentração de detergente nas faixas avaliadas.
2. De modo geral, as respostas do agitador e cesto são parecidas e amostras podem ser coletadas de apenas um desses compartimentos.
3. Para se obter uma melhor precisão do fenômeno, o intervalo de coleta deve ser o menor possível (a limitação atual é o processo de coleta), principalmente nos primeiros 3 minutos, porque a obtenção do equilíbrio entre tanque e cesto ocorre no referido intervalo de tempo.
4. A sonda pequena apresentou respostas mais lentas em relação à grande devido ao fato de que aquela possui mais camadas de tecido do que essa. Além disso, o processo de transferência de massa em ambas é mais lento em relação ao tanque e cesto. Nesse caso, pode-se, portanto, utilizar intervalos de coleta mais espaçados.
5. A decantação das amostras tem maior influência nas primeiras horas após a coleta; já a homogeneização das mesmas não interfere significativamente.
6. O ponto de coleta inferior se mostrou ser o que melhor evidencia a transferência de massa bem como a decantação.

7. Com o procedimento utilizado, observou-se a ocorrência de decantação e esta é mais evidente ao se inserir o detergente no tanque.
8. A agitação tem papel fundamental na homogeneização da mistura contida na lavadora. Para casos onde não existe esta ação, o conjunto pode demorar mais de vinte e quatro horas para atingir o equilíbrio.
9. A sonda pequena apresenta melhor repetitividade em relação à grande.
10. O rigor na obtenção da função de transferência é fundamental para a minimização do erro experimental.

4 RESULTADOS

4.1 RESULTADOS DO EXPERIMENTO FATORIAL

Todos os resultados das condições testadas encontram-se no Apêndice V. São apresentados três exemplos a seguir: o primeiro referente a uma condição de inserção de detergente no tanque (Figura 50), o segundo com adição de material no cesto (Figura 51) e o terceiro focado no comportamento da sonda (Figura 52).

Na Figura 50 observa-se o decaimento da concentração nos instantes iniciais, o que é efeito da decantação do detergente devido ao local de inserção (tanque). Porém, após aproximadamente 30 segundos de agitação, a concentração volta a se elevar. Isto se deve à advecção existente entre tanque e volume morto. Recordando a equação (23), a parcela advectiva citada é o termo \dot{V}_{T-VM} . A outra contribuição advectiva (\dot{V}_{T-C}), relacionando o fluxo entre o tanque e o cesto, é responsável pela aproximação das concentrações nos compartimentos. Isto ocorre também no intervalo de aproximadamente 30 segundos no caso em análise. Ao se atingir seis minutos de operação, o sistema atingiu a concentração de equilíbrio que é, para o caso em questão, 0,75 g/L. Assim, a partir desse momento, todo o detergente está disponível (dissolvido homogeneamente) para atuar na lavadora, o que tende a promover uma boa eficiência química.

O segundo exemplo é mostrado na Figura 51, onde se ressalta a influência da advecção para a homogeneização entre tanque e cesto. Esta é descrita na equação (24) pela vazão entre ambos os compartimentos (\dot{V}_{T-C}). O primeiro ponto experimental (no tempo zero) não apresentou uma alta concentração no cesto provavelmente pela localização do ponto de coleta, o qual não conseguiu captar a existência de detergente. De todo modo, em apenas um minuto os compartimentos entraram em equilíbrio entre si e, ao mesmo tempo, no regime permanente da mistura (neste caso, 0,75 g/L). Assim, em pouco tempo (menos de 5% do período total de ciclo) o detergente já se encontra homogêneo na lavadora.

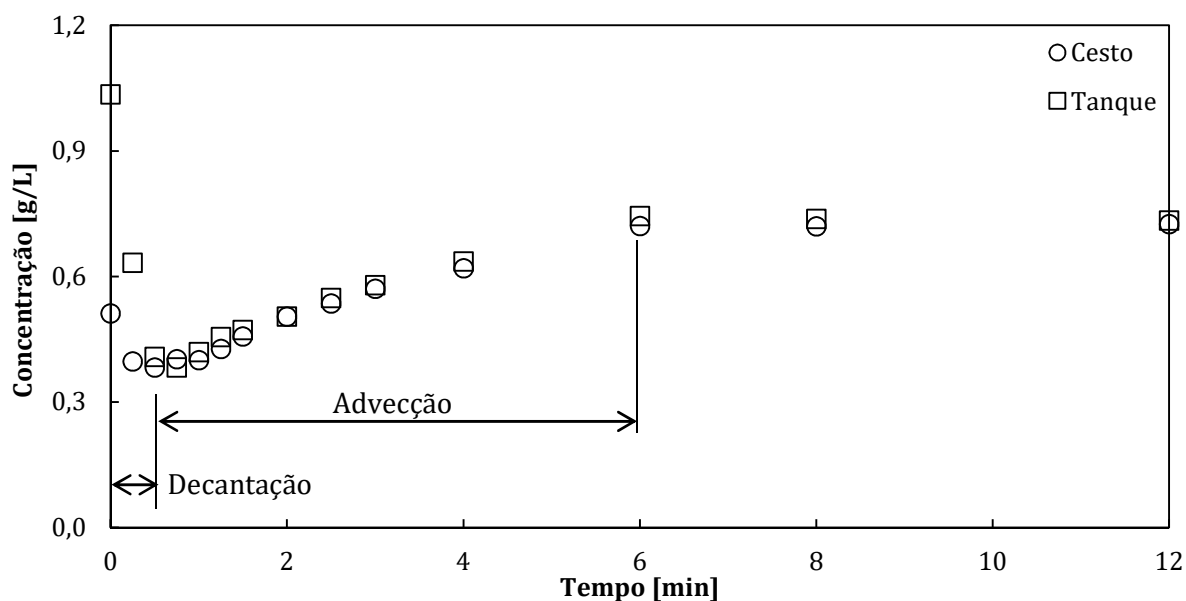


Figura 50 – Variação da concentração de detergente no tanque e no cesto na condição 3ⁱ do experimento fatorial.

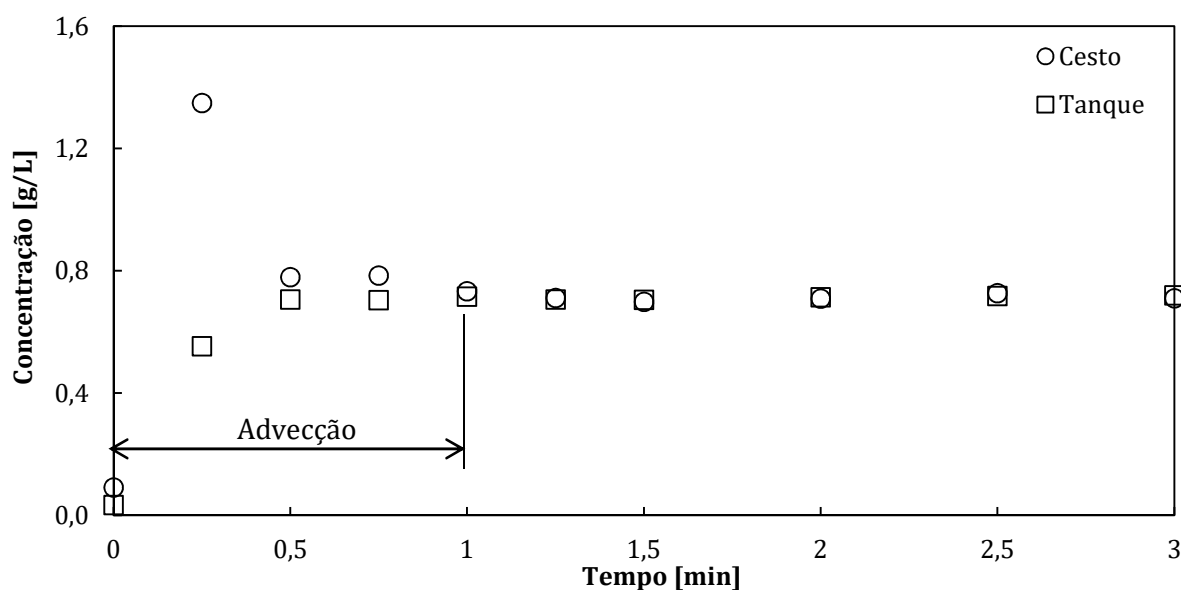


Figura 51 – Variação da concentração de detergente no tanque e no cesto na condição 4ⁱⁱ do experimento fatorial.

Analisando-se apenas o comportamento da sonda, apresentado na Figura 52, fica evidente que a transferência de massa ocorre mais suavemente neste local em relação ao tanque e cesto e, por consequência, demanda mais tempo. Assim, nota-se que o termo

ⁱ Condição 3: inserção no tanque, agitação forte, 70 litros de água, concentração de 0,75 g/L.

ⁱⁱ Condição 4: inserção no cesto, agitação forte, 70 litros de água, concentração de 0,75 g/L.

difusivo (D_{ef}) presente nas equações (28), (29) e (30) é importante para descrever o transporte de detergente na sonda.

Serão descritos a seguir alguns dos aprendizados obtidos coma a realização do experimento fatorial. Para todas as condições testadas, o equilíbrio entre tanque e cesto foi atingido rapidamente (no máximo em 3 minutos).

Houve também decantação do detergente em todas as condições nas quais o detergente foi inserido no tanque. Tal comportamento pode ser observado na Figura 53, onde há uma “depressão” existente nos primeiros 5 minutos para o tanque e cesto. Nos casos em que esse comportamento foi constatado, observou-se que a homogeneização do conjunto está relacionada com a intensidade da agitação.

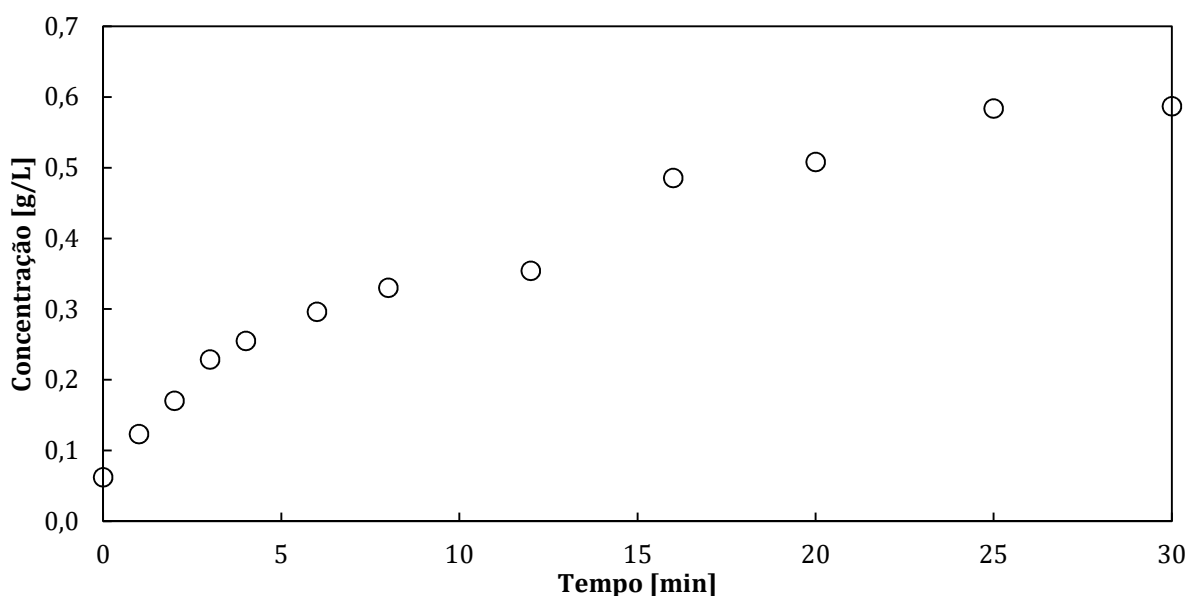


Figura 52 – Variação da concentração de detergente na sonda na condição 9ⁱⁱⁱ do experimento fatorial.

Na configuração 3, apresentada na Figura 53, houve um processo rápido de mistura, pois o golpe utilizado estava no nível alto. Porém, para condições com agitação fraca (nível baixo), como é o caso do teste 1, apresentado na Figura 54, a homogeneização é consideravelmente mais lenta (também observado nos testes 5, 9 e 13). Para vários casos em que a inserção foi realizada no tanque (com exceção apenas das condições 3 e 11), não se atingiu a concentração inicialmente inserida (nos casos da Figura 53 e da Figura 54, o valor de equilíbrio é 0,75 g/L) indicando que a completa homogeneização não

ⁱⁱⁱ Condição 9: inserção no tanque, agitação suave, 70 litros de água, concentração de 1,25 g/L.

foi atingida no tempo de 30 minutos. Dessa forma, após o término da agitação ainda há detergente não dissolvido, ou seja, decantado no fundo do tanque.

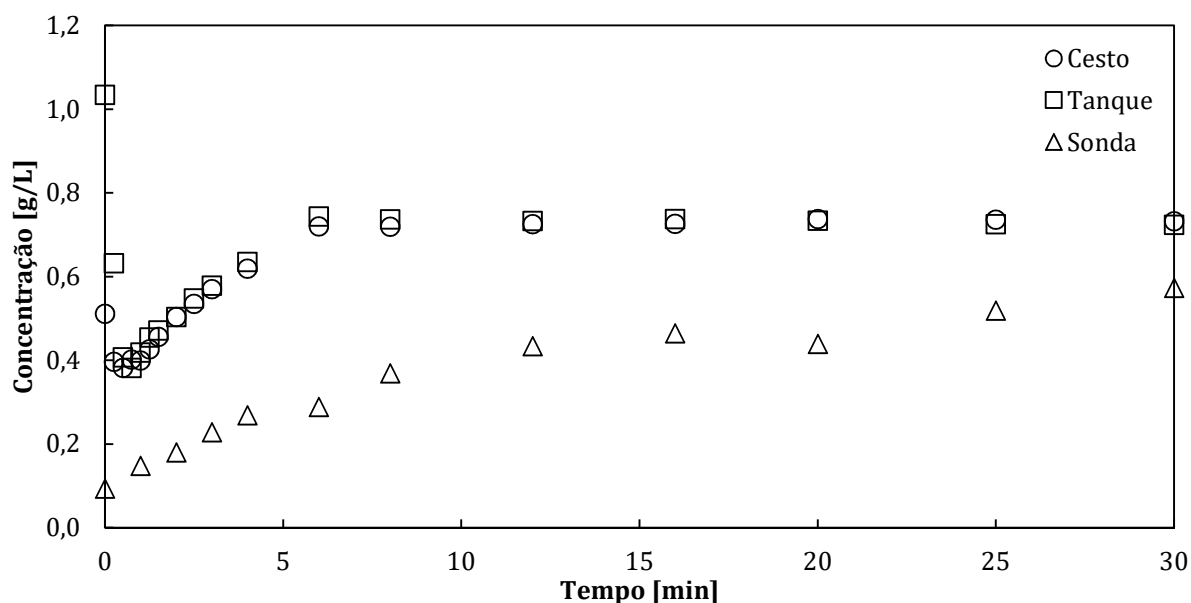


Figura 53 – Variação da concentração para a configuração 3^{iv} do experimento fatorial.

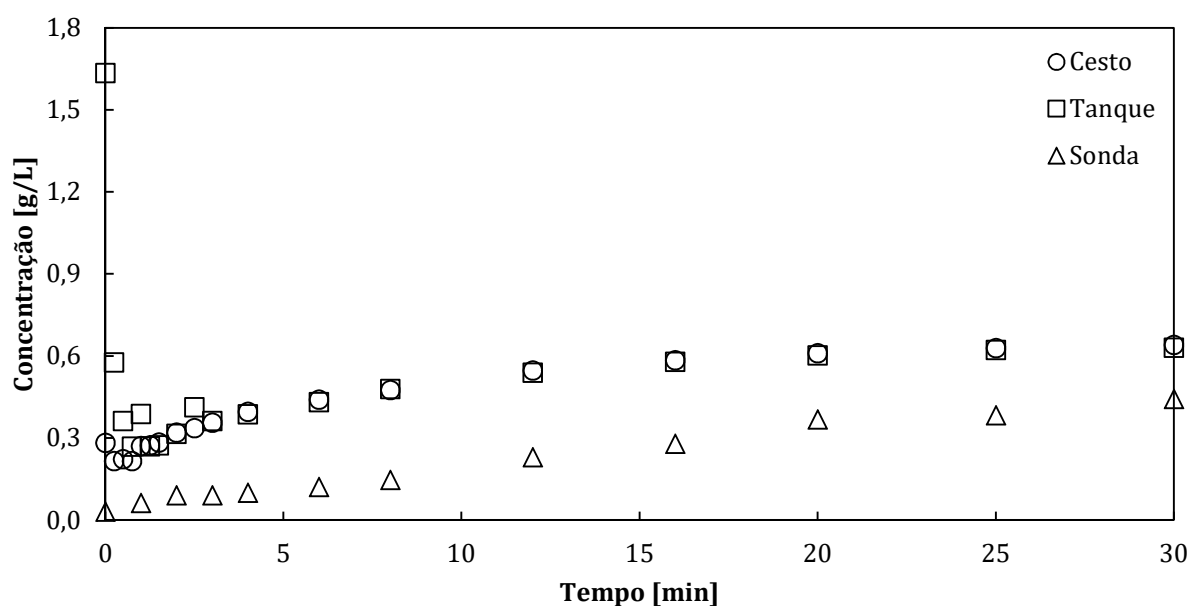


Figura 54 – Variação da concentração para a configuração 1^v do experimento fatorial.

Houve ainda a ocorrência de períodos de estagnação das leituras da sonda, como ocorre na configuração 6, mostrado na Figura 55. Isto foi notado em todas as configurações, porém com períodos mais longos em alguns casos específicos, como o caso

^{iv} Condição 3: inserção no tanque, agitação forte, 70 litros de água, concentração de 0,75 g/L.

^v Condição 1: inserção no tanque, agitação suave, 70 litros de água, concentração de 0,75 g/L.

citado o que é um indício de erro experimental inerente à metodologia adotada. Isto provavelmente ocorre porque a sonda, inicialmente no fundo do cesto, sobe até a superfície livre e lá permanece normalmente próxima à parede do cesto. Em todos os testes esse padrão se repetiu. Todavia, a movimentação da sonda está fora do controle assim como a trajetória de qualquer tecido presente na lavadora.

Um comportamento que merece destaque foi observado nas configurações 5 (e na 13). Em ambas a inserção de detergente foi realizada no tanque, com nível alto de água e agitação suave. Nessas, o primeiro ponto medido no tanque foi bastante elevado, conforme se nota na Figura 56, que mostra o resultado do teste número 5. Talvez isso ocorra por serem configurações nas quais existe maior tendência de o detergente decantar devido à combinação de inserção, volume de água e intensidade de agitação de ambas configurações.

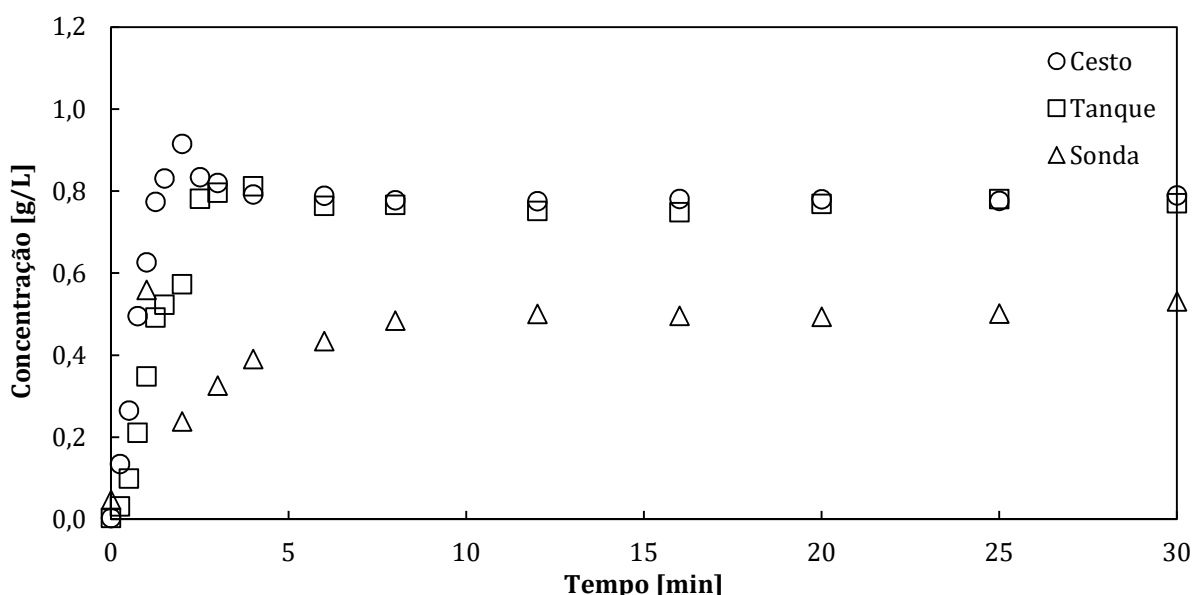


Figura 55 – Variação da concentração para a configuração 6^{vi} do experimento fatorial.

^{vi} Condição 6: inserção no cesto, agitação suave, 90 litros de água, concentração de 0,75 g/L.

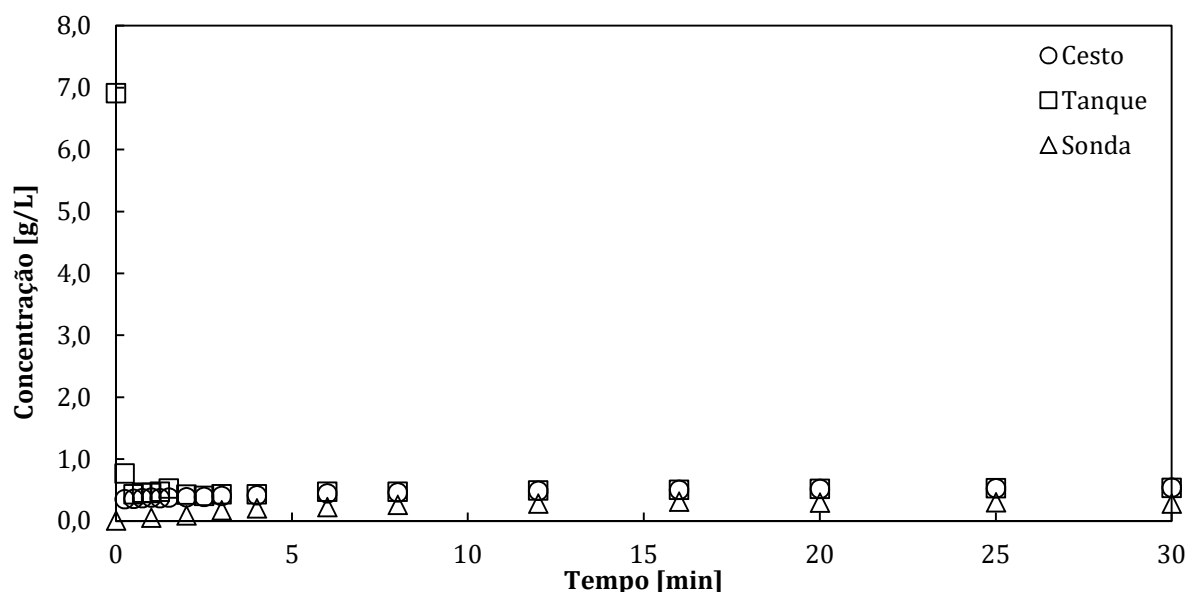


Figura 56 – Variação da concentração para a configuração 5^{vii} do experimento fatorial.

Na sequência serão feitas análises dos resultados com o uso de ferramentas estatísticas.

4.1.1 Análise da sensibilidade do experimento fatorial

Conforme é apresentado na Tabela 3, optou-se por delinear um experimento com 4 fatores, cada qual com 2 níveis, o que totalizou 16 configurações. A análise dos resultados foi realizada através de uma regressão segundo a seguinte superfície:

$$\begin{aligned} \hat{\gamma} = & \lambda_0 + \lambda_1\hat{F}_1 + \lambda_2\hat{F}_2 + \lambda_3\hat{F}_3 + \lambda_4\hat{F}_4 + \lambda_{12}\hat{F}_1\hat{F}_2 + \lambda_{13}\hat{F}_1\hat{F}_3 \\ & + \lambda_{14}\hat{F}_1\hat{F}_4 + \lambda_{23}\hat{F}_2\hat{F}_3 + \lambda_{24}\hat{F}_2\hat{F}_4 + \lambda_{34}\hat{F}_3\hat{F}_4 \\ & + \lambda_{123}\hat{F}_1\hat{F}_2\hat{F}_3 + \lambda_{124}\hat{F}_1\hat{F}_2\hat{F}_4 + \lambda_{134}\hat{F}_1\hat{F}_3\hat{F}_4 + \lambda_{234}\hat{F}_2\hat{F}_3\hat{F}_4 \\ & + \lambda_{1234}\hat{F}_1\hat{F}_2\hat{F}_3\hat{F}_4 \end{aligned} \quad (40)$$

onde $\hat{\gamma}$ se refere à variável resposta adimensionalizada, λ trata dos coeficientes calculados através do método dos mínimos quadrados e \hat{F} representa cada um dos fatores em análise. A adimensionalização dos fatores (por isso do índice $\hat{}$ sobre o F) é feita da seguinte forma:

$$\hat{F} = 2 \frac{F - F_{\text{mínimo}}}{F_{\text{máximo}} - F_{\text{mínimo}}} - 1 \quad (41)$$

^{vii} Condição 5: inserção no tanque, agitação suave, 90 litros de água, concentração de 0,75 g/L.

Dessa forma, cada um dos fatores assume um valor no intervalo de -1 (mínimo) e 1 (máximo). Os coeficientes λ fornecem a sensibilidade das variáveis resposta ao referido fator. Assim, quando maior for o coeficiente, maior é a sua influência.

As variáveis resposta selecionadas para a análise são listadas a seguir. As cinco primeiras são focadas na interação tanque e cesto e as quatro últimas são direcionadas à sonda.

- 1) Tempo para atingir o equilíbrio entre tanque e cesto.
- 2) Relação entre a concentração inserida e concentração média do tanque e cesto em 6 minutos.
- 3) Relação entre a concentração inserida e concentração média do tanque e cesto em 16 minutos.
- 4) Relação entre a concentração inserida e concentração média do tanque e cesto em 30 minutos.
- 5) Inverso do tempo^{viii} no qual o tanque e cesto atingem a concentração inserida
- 6) Percentual da concentração inserida presente na sonda em 6 minutos.
- 7) Percentual da concentração inserida presente na sonda em 16 minutos.
- 8) Percentual da concentração inserida presente na sonda em 30 minutos.
- 9) Diferença relativa entre a concentração da sonda e a concentração média do tanque e cesto em 30 minutos.

Foram feitas duas análises: a primeira delas utilizou o método de regressão descrito pela equação (40) e, a partir dele, obtiveram-se os coeficientes adimensionais de cada fator. A segunda abordagem foi a análise da variância, descrita no decorrer desta seção. Todos os resultados estão apresentados no Apêndice VI.

Para a primeira variável resposta o resultado é mostrado na Figura 57. Nela, averigua-se que os fatores *inserção* (I), *agitação* (A) e *volume* (V) têm grande efeito. Tanto a inserção quanto o volume têm efeito positivo, ou seja, ao utilizar o nível alto (cesto e 90L, respectivamente), a variável resposta aumenta. Contudo, este não é o comportamento desejado, pois quanto menor for o tempo de equilíbrio entre tanque e

^{viii} O motivo de se ter optado pelo uso do “inverso do tempo” ao invés do tempo é o de que, em algumas configurações de teste, o sistema não atingiu a concentração inserida. Assim, para análise estatística dos dados ficar consistente, para esses casos considerou-se que a resposta é nula, ao invés de infinita ou desconhecida.

cesto, melhor. Já a agitação tem a maior influência e seu efeito é negativo, ou seja, quanto mais intensa for a agitação, menor a variável resposta.

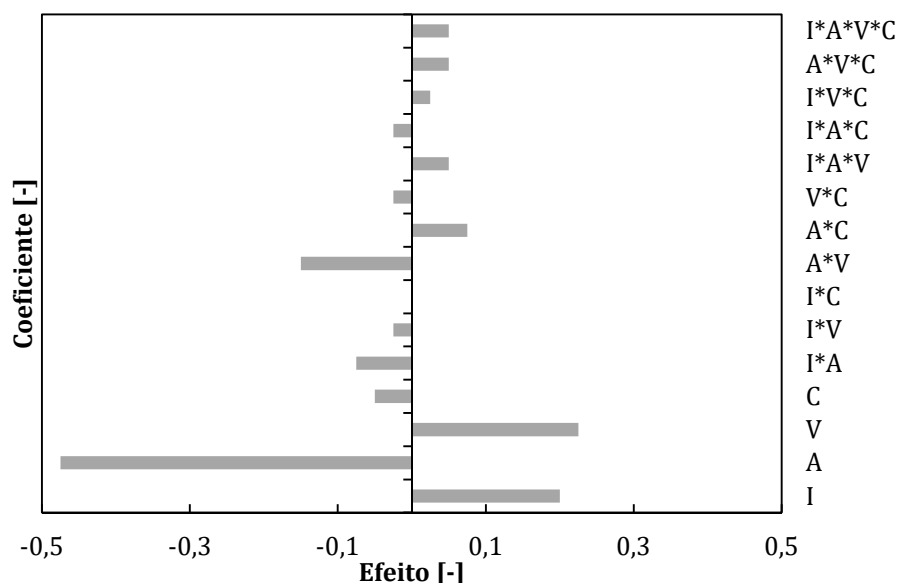


Figura 57 – Análise de sensibilidade do tempo de equilíbrio entre tanque e cesto do experimento fatorial.

Da segunda à quarta variável resposta, o fator com coeficiente maior foi a inserção, sempre com efeito positivo, porém diminuindo com o passar do tempo de agitação. Isto é coerente pelo fato que, ao inserir o detergente no tanque (nível baixo), existe a tendência de decantação e não de homogeneização. Para o inverso do tempo, no qual o tanque e cesto atingem a concentração inserida, o resultado foi semelhante ao obtido na segunda, terceira e quarta variável resposta.

Ao se examinar todas as respostas da sonda, os fatores mais relevantes foram a inserção e a agitação sendo que esta aumenta a sua influência com o passar do tempo.

Mostra-se na Figura 58 o resultado da diferença relativa entre a concentração da sonda e a concentração média do tanque e cesto em 30 minutos. Para este caso, os efeitos dos fatores mais fortes são negativos (i.e., se a agitação for forte diminuirá a diferença). Já para as variáveis percentuais da sonda, o efeito é positivo de tal forma que, se a inserção for realizada no cesto e adotando-se agitação forte, aumentam-se as frações da concentração inserida presente no tecido.

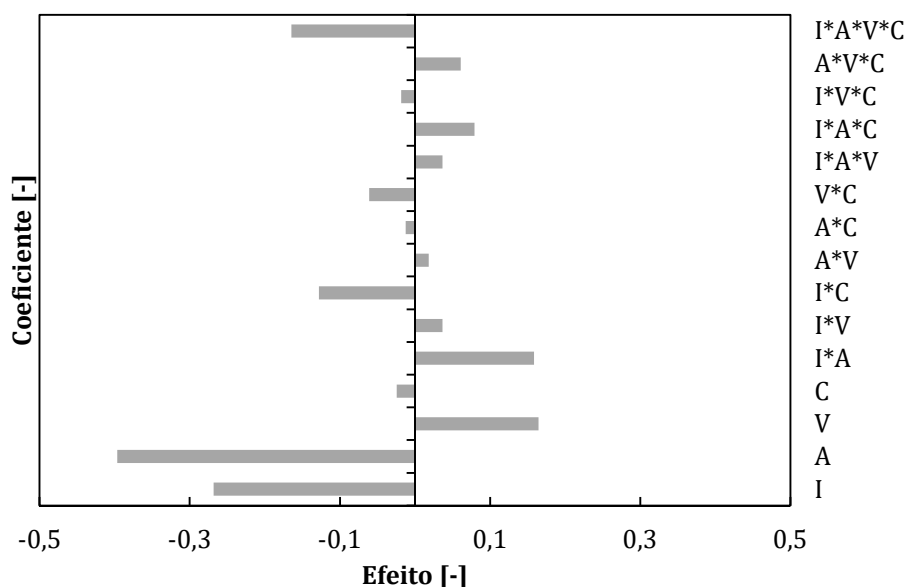


Figura 58 – Análise de sensibilidade da diferença relativa entre a concentração da sonda e a concentração média do tanque e cesto em 30 minutos do experimento fatorial.

Através do método de regressão apresentado, destaca-se a importância principalmente de dois parâmetros: a inserção e a agitação. Mas a análise dos coeficientes não mostra se os fatores podem ser considerados estatisticamente significativos. Assim, realizou-se uma análise da variância para as mesmas variáveis resposta.

Segundo Casella (2010), em sua forma mais simples, a análise da variância (*Analysis of Variance – ANOVA*), é um método de estimação das médias de diversas populações, frequentemente assumidas como normalmente distribuídas. O método consiste em:

- Calcular os chamados “contrastes” para cada uma das configurações testadas: variável resposta multiplicada pelo nível do fator em estudo.
- Somar o quadrado dos contrastes e dividir pelo número de configurações testadas. Se houver repetições, a soma dos contrastes também deve ser dividida pelo número de recorrências. A soma dos quadrados deve ser dividida pelos graus de liberdade, o que fornece o quadrado médio.
- O último passo é a divisão do quadrado médio do fator em análise pelo quadrado médio do resíduo. O valor obtido deve ser comparado com tabelas da distribuição F de Snedecor (disponível no Apêndice VII) para o nível de significância adotado. No presente trabalho, adotou-se como padrão 5 %.

Os resultados encontrados da análise da variância encontram-se resumidos na Tabela 4, mas os dados completos estão no Apêndice VI.

Tabela 4 – Resumo da análise da variância do experimento fatorial.

Número	Variável Resposta	Fator (es) Significativo (s)
1	Tempo para atingir o equilíbrio entre tanque e cesto	Inserção Agitação Volume
2	Relação entre a concentração inserida e concentração média do tanque e cesto em 6 minutos	Inserção
3	Relação entre a concentração inserida e concentração média do tanque e cesto em 16 minutos	Inserção
4	Relação entre a concentração inserida e concentração média do tanque e cesto em 30 minutos	Inserção
5	O inverso do tempo no qual o tanque e cesto atingem a concentração inserida	Inserção Agitação
6	Percentual da concentração inserida presente na sonda em 6 minutos	Inserção
7	Percentual da concentração inserida presente na sonda em 16 minutos	Inserção Agitação
8	Percentual da concentração inserida presente na sonda em 30 minutos	Inserção Agitação
9	Diferença relativa entre a concentração da sonda e a concentração média do tanque e cesto em 30 minutos	Inserção Agitação

Nota-se que as análises têm coerência entre si, ou seja, fornecem interpretações semelhantes dos resultados.

No presente estudo, um objetivo consiste em obter a homogeneização da mistura o mais rápido possível. Dessa forma, a combinação que melhor atinge essa meta é a inserção do detergente no cesto bem como agitação forte. Caso fosse desejado um processo de mistura mais gradual, a adição do material deve vir a ser feita no tanque. Para todas as configurações testadas, a concentração não se mostrou relevante.

4.1.2 Informação complementar sobre o experimento fatorial

Entre cada teste, era feito um ciclo de limpeza, mas, ainda assim, era comum ter resíduo de detergente no fundo do tanque (marcas brancas na Figura 59 e na Figura 60).

A quantidade observada era consideravelmente maior nas configurações nas quais o detergente era inserido no tanque. As imagens são comprovações da ocorrência da decantação. Além disso, às vezes, pequena parte do detergente permanecia na parede do tanque (região acima do nível de água) ao inseri-lo neste compartimento.



Figura 59 – Fundo do tanque após configuração 10 com resquícios brancos de detergente (inserção no cesto).



Figura 60 – Fundo do tanque após configuração 13 com resquícios brancos de detergente (inserção no tanque).

4.2 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL

Com a base de dados experimentais, a próxima etapa foi a calibração do modelo computacional aos resultados obtidos. Para se ajustar as curvas extraídas da solução do modelo numérico aos pontos experimentais, foram ajustados os seguintes parâmetros, os quais dão o caráter semi-empírico ao modelo:

1. \dot{V}_{T-C} : Vazão entre tanque e cesto
2. \dot{V}_{C-N} : Vazão entre camada interna da sonda e cesto
3. D_{ef} : Difusividade efetiva
4. \dot{V}_{T-VM} : Vazão entre tanque e volume morto
5. X : Percentual da massa total inserida no volume morto

Destaca-se que as últimas duas variáveis só foram utilizadas nos casos cuja inserção foi realizada no tanque e, conseqüentemente, houve decantação.

A seguir são apresentados apenas alguns comparativos entre os resultados numéricos e experimentais, mas todos os resultados constam no Apêndice VIII. Destaca-se o fato de que os pontos experimentais contêm barras de incerteza para cada ponto experimental, as quais foram definidas no Apêndice IV.

Na Figura 61, mostra-se o comparativo para o teste 7 do experimento fatorial. Este é um caso no qual se utilizou o modelo da decantação e, devido a isso, o modelo captou as tendências experimentais.

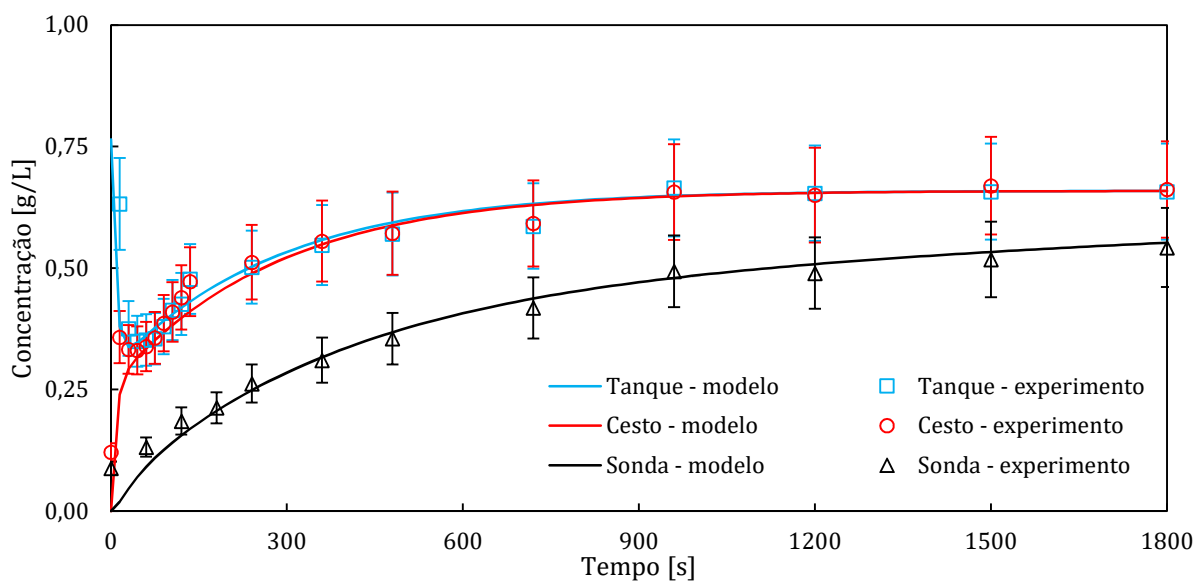


Figura 61 – Comparativo modelo numérico com dados experimentais para o teste 7^{ix} do experimento fatorial.

^{ix} Condição 7: inserção no tanque, agitação forte, volume de 90 litros, concentração de 0,75 g/L.

Para as condições 3, 9 e 11 (Figura 62), observou-se que no primeiro minuto o modelo considera que a inserção do detergente ocorre no tanque e, conseqüentemente, a curva que representa o cesto inicia-se em zero. Em contrapartida os primeiros pontos experimentais não são nulos, o que se deve ao processo de inserção do detergente, o qual provavelmente migrou através dos furos do cesto, durante a decantação. Verifica-se, ainda, que o modelo ajustou bem as tendências experimentais no transiente (60 a 300 segundos). Já no regime permanente, não se conseguiu captar com tanta fidelidade o fenômeno pois ainda existe massa decantada (presente no volume morto). Mesmo que ainda exista uma diferença entre os dados coletados e os valores do modelo no regime permanente, parte disso se deve aos erros experimentais.

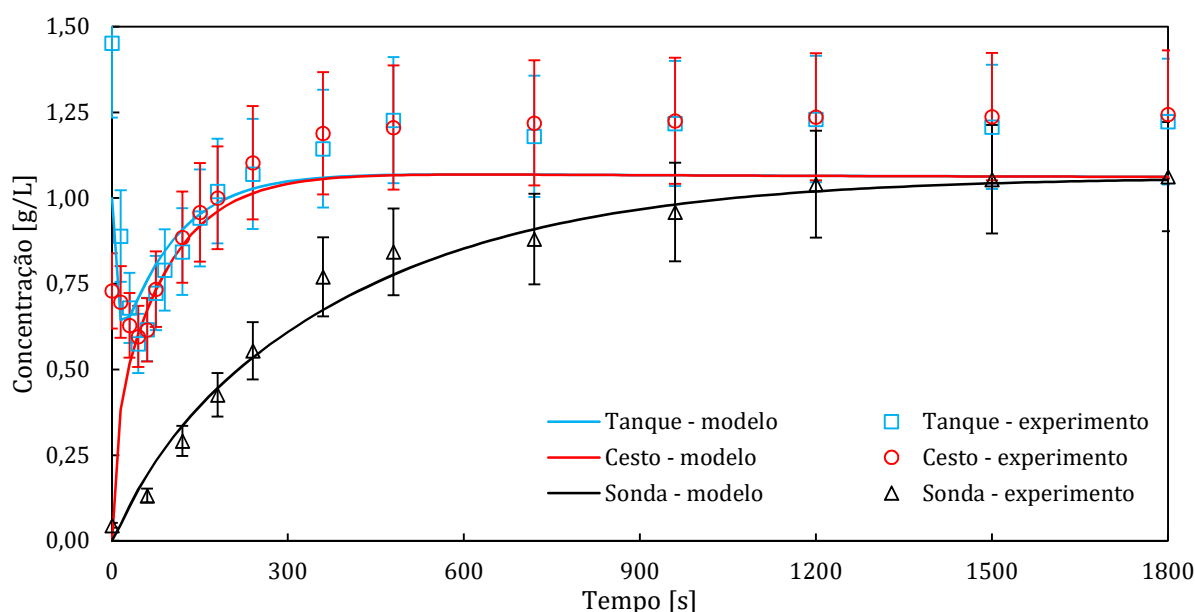


Figura 62 – Comparativo modelo numérico com dados experimentais para o teste 11^x do experimento fatorial.

Para casos nos quais a inserção foi feita no cesto, o modelo não considera efeitos de decantação. Por conseguinte, a solução do programa computacional é mais simples, pois, menos equações diferenciais devem ser resolvidas. O comparativo com a configuração 8 do experimento fatorial, mostrado na Figura 63, apresentou concordância satisfatória.

As comparações com os testes 4, 12, 14 e 16 apresentaram um distanciamento praticamente constante entre os dados experimentais do tanque e cesto após ser atingido

^x Condição 11: inserção no tanque, agitação forte, volume de 70 litros, concentração de 1,25 g/L.

o equilíbrio entre os compartimentos, como mostra a Figura 64. Isto é um reforço de que as previsões numéricas estão dentro da banda de incerteza experimental.

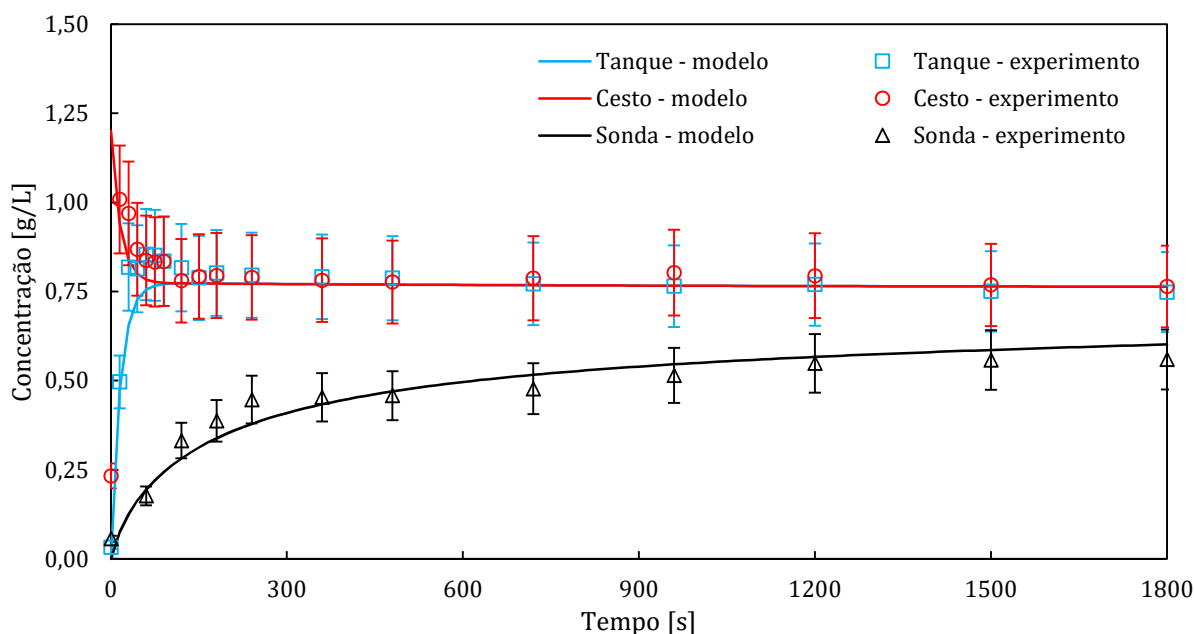


Figura 63 – Comparativo modelo numérico com dados experimentais para o teste 8^{xi} do experimento fatorial.

A diferença existente nos instantes iniciais (de 0 a 90 segundos) nas configurações 2, 6, 10 e 14, dentre as quais se mostra o ensaio 6 na Figura 65, é marcante. A tendência numérica, principalmente do cesto, diverge do experimental e estima-se que isto aconteça pela localização da região de captura das amostras (evidenciado na Figura 48). Pelo fato da adição do detergente ser feita pelo topo do cesto e o ponto de coleta estar localizado na parte inferior deste compartimento, existe um atraso para captar a presença desse insumo. Além disso, existem dois fatores que contribuem para que o detergente leve mais tempo para chegar ao fundo do cesto: a presença dos tecidos e uma intensidade suave de agitação. A partir de aproximadamente 2 minutos, existe uma boa convergência entre experimento e modelo numérico.

Os valores dos parâmetros de ajuste para cada uma das configurações testadas, são mostrados no Apêndice IX. A análise de sensibilidade dos parâmetros de ajuste é apresentada a seguir.

^{xi} Condição 8: inserção no cesto, agitação forte, volume de 90 litros, concentração de 0,75 g/L.

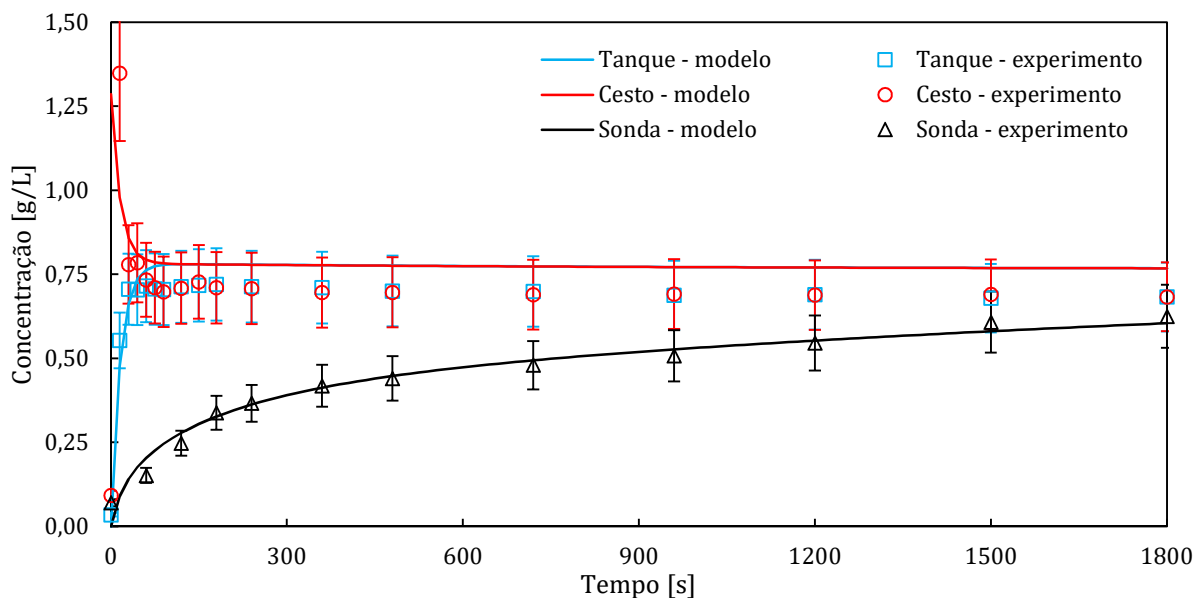


Figura 64 – Comparativo modelo numérico com dados experimentais para o teste 4^{xii} do experimento fatorial.

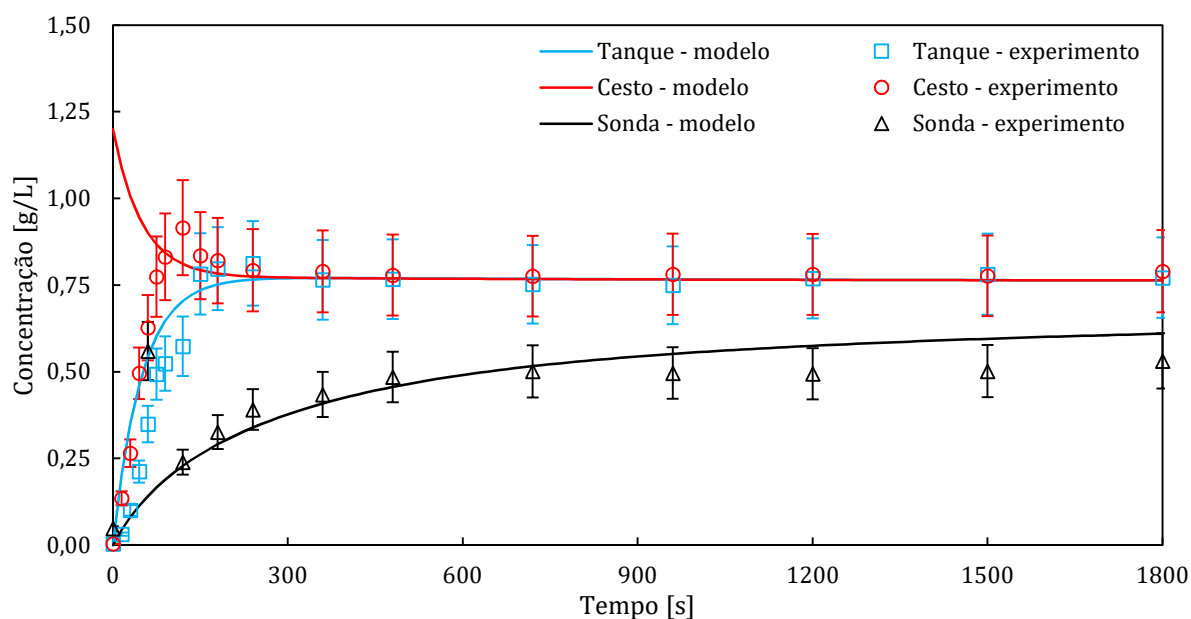


Figura 65 – Comparativo modelo numérico com dados experimentais para o teste 6^{xiii} do experimento fatorial.

4.2.1 Análise de sensibilidade dos parâmetros de ajuste

Com o intuito de compreender como os fatores operacionais do experimento fatorial influenciam os parâmetros de ajuste, fez-se uma análise de sensibilidade. Para

^{xii} Condição 4: inserção no cesto, agitação forte, volume de 70 litros, concentração de 0,75 g/L.

^{xiii} Condição 6: inserção no cesto, agitação suave, volume de 90 litros, concentração de 0,75 g/L.

tanto, foi utilizado o modelo de regressão dado pela equação (40). Todavia, nas situações em que ocorreu decantação, a superfície adotada foi mais enxuta (o fator inserção é mantido constante) e é dada por:

$$\hat{Y} = \lambda_0 + \lambda_1 \hat{F}_1 + \lambda_2 \hat{F}_2 + \lambda_3 \hat{F}_3 + \lambda_{12} \hat{F}_1 \hat{F}_2 + \lambda_{13} \hat{F}_1 \hat{F}_3 + \lambda_{23} \hat{F}_2 \hat{F}_3 + \lambda_{123} \hat{F}_1 \hat{F}_2 \hat{F}_3 \quad (42)$$

Para a vazão entre tanque e cesto (\dot{V}_{T-C}), nota-se, na Figura 66, que a inserção e a agitação se mostram mais intensas que os demais fatores. A análise da variância deste caso destacou que esses dois parâmetros são os únicos significativos. Ressalta-se que os sentidos dos efeitos dos fatores relevantes estão em sentidos contrários. Dessa forma, quanto maior for a intensidade de agitação e inserção no nível baixo (ou seja, tanque), maior será a vazão.

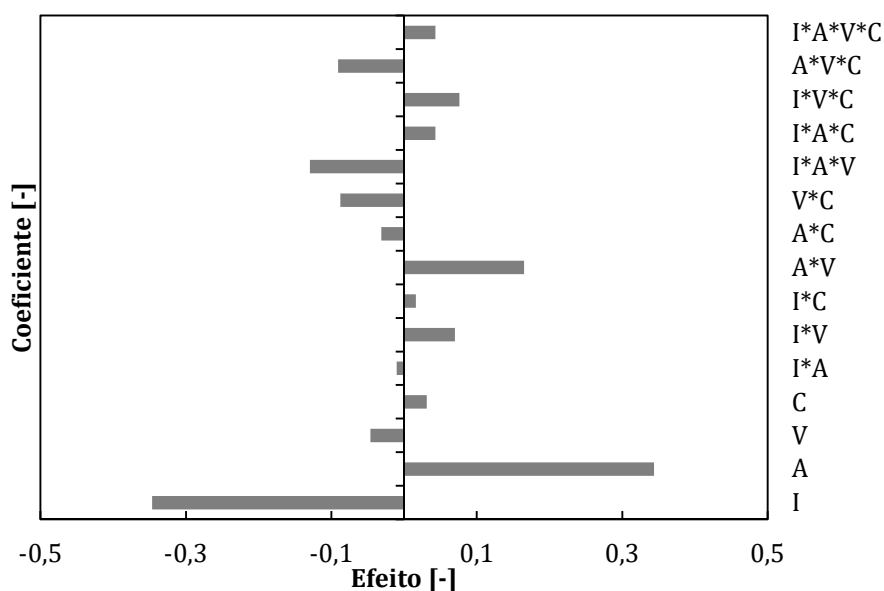


Figura 66 – Análise de sensibilidade da vazão entre tanque e cesto em relação aos fatores do experimento realizado.

No caso da vazão entre camada interna da sonda e cesto (\dot{V}_{C-N}), a agitação foi o termo preponderante. Isto foi visto tanto pela análise da variância quanto pela magnitude dos coeficientes conforme se apresenta na Figura 67. O fato do efeito ser positivo condiz com o conceito de que, para se ter maior advecção, maior deve ser a agitação. Consequentemente, maior será a quantidade de fluido que entrará no interior da sonda pelas frestas existentes na mesma.

Por outro lado, tanto a difusividade efetiva (D_{ef}) quanto o percentual da massa total inserida no volume morto (X), não foram sensíveis a nenhum dos fatores operacionais segundo a análise da variância. De todo modo, mostra-se na Figura 68 e na

Figura 69 os efeitos dos coeficientes para os parâmetros citados. Nessas imagens, observa-se que os efeitos mais elevados estão na combinação de todos os fatores, o que evidencia que os resíduos são maiores do que qualquer fator independente.

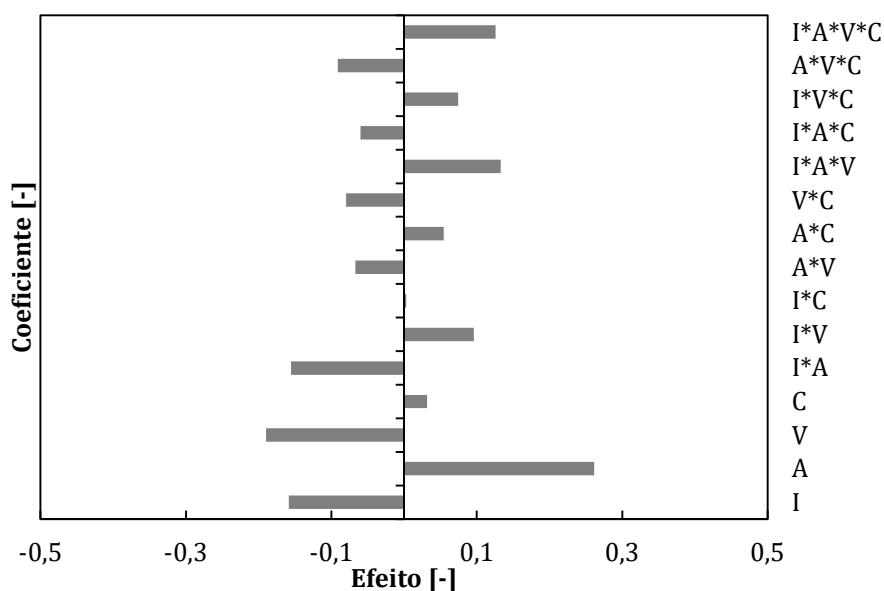


Figura 67 – Análise de sensibilidade da vazão entre cesto e meio da sonda em relação aos fatores do experimento realizado.

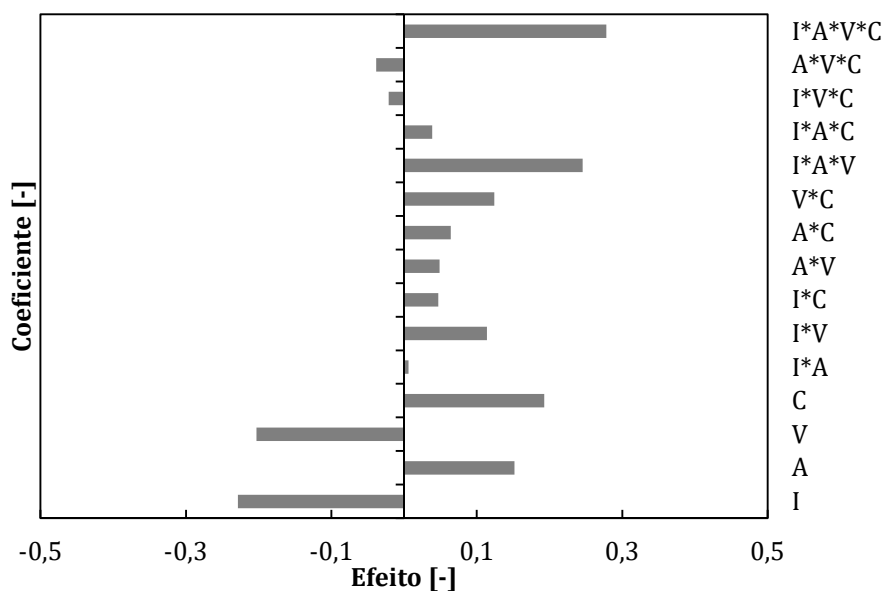


Figura 68 – Análise de sensibilidade da difusividade efetiva em relação aos fatores do experimento realizado.

Por fim, na Figura 70, mostra-se como a vazão entre tanque e volume morto (\dot{V}_{T-VM}) é afetada pelos fatores operacionais. Neste caso, a agitação e o volume de água foram significativos, porém com efeitos contrários: para se obter uma vazão elevada, deve-se ter uma agitação intensa, porém com volumes menores de água.

Apresenta-se na Tabela 5 um resumo de como os parâmetros numéricos são afetados pelos fatores operacionais adotados nos experimentos realizados.

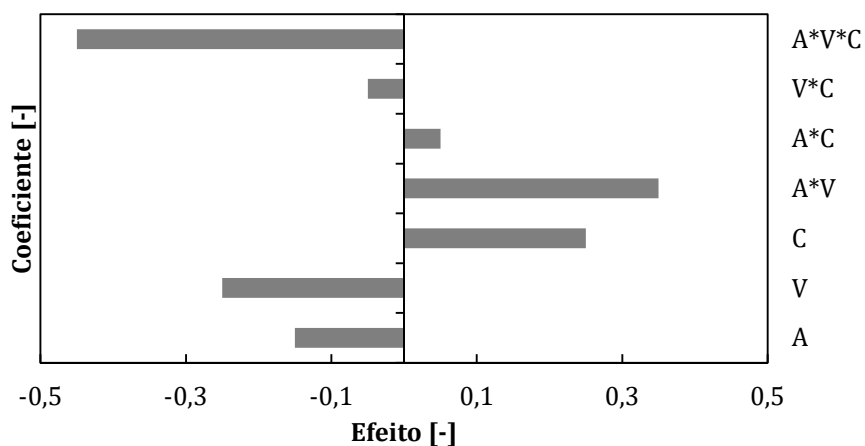


Figura 69 – Análise de sensibilidade do percentual da massa inserida no volume morto em relação aos fatores do experimento realizado.

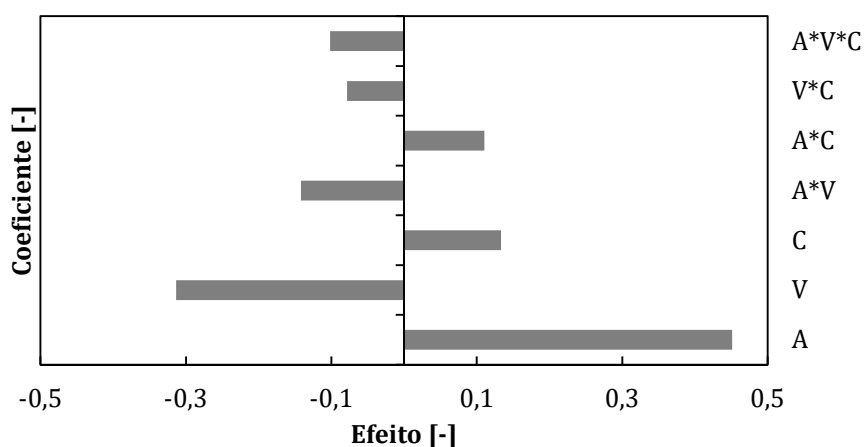


Figura 70 – Análise de sensibilidade da vazão entre tanque e volume morto em relação aos fatores do experimento realizado.

Tabela 5 – Resumo da análise da variância dos parâmetros do modelo numérico em relação aos fatores do experimento.

Símbolo	Parâmetro do modelo numérico	Fator (es) Significativo (s)
\dot{V}_{T-C}	Vazão entre tanque e cesto	Inserção Agitação
\dot{V}_{C-N}	Vazão entre camada interna da sonda e cesto	Agitação
D_{ef}	Difusividade efetiva	Nenhum
\dot{V}_{T-VM}	Vazão entre tanque e volume decantado	Agitação Volume
X	Percentual da massa total inserida no volume decantado	Nenhum

4.2.2 Influência dos parâmetros empíricos na variação de concentração de detergente

A partir do comparativo feito entre o modelo computacional e dados experimentais, foram realizadas novas análises. Na seção anterior, mostrou-se que três parâmetros do modelo são influenciados significativamente por fatores operacionais testados. Portanto, esses três parâmetros empíricos terão suas grandezas variadas em três níveis hipotéticos para verificar a sua influência na variação da concentração de detergente (por vezes no cesto, em outros casos, na sonda). Destaca-se que todos os casos descritos consideram os parâmetros (do modelo e experimentais) usados na condição 15^{xiv} do experimento fatorial. No caso citado, o ajuste do modelo foi satisfatório e trata-se de uma condição na qual os três parâmetros significativos são utilizados.

Iniciando com a vazão entre tanque e cesto (\dot{V}_{T-C}), a Figura 71 mostra a variação de concentração no cesto. Observa-se que esse é um fator que influencia fortemente a transferência de massa no referido compartimento. Valores mais elevados fazem com que a homogeneização entre ambos ocorra mais rapidamente e magnitudes menores não atingem o equilíbrio dentro do período avaliado. O mesmo tipo de comportamento foi observado na sonda.

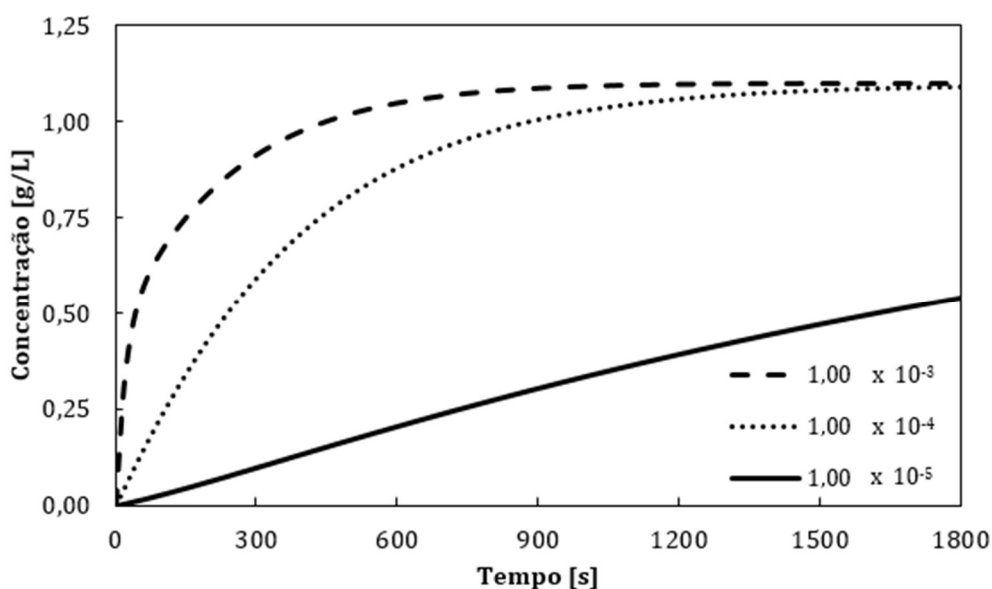


Figura 71 – Variação da concentração de detergente no cesto alterando apenas a vazão entre tanque e cesto (\dot{V}_{T-C}).

^{xiv} Condição 15: inserção no tanque, agitação forte, volume de 90 litros, concentração de 1,25 g/L.

No caso da vazão entre cesto e o meio da sonda (\dot{V}_{C-N}), não houve influência nas variações no tanque e cesto e, por isso, não são mostrados gráficos. Apresentam-se as variações de concentração na camada mais interna do tecido na Figura 72. A partir desta, observa-se que, para se atingir o equilíbrio na sonda, são necessários valores elevados da vazão em análise. Entretanto, considerando o significado do parâmetro em questão, isso implica em uma sonda com mais vazamentos, o que não corresponde ao comportamento desejado.

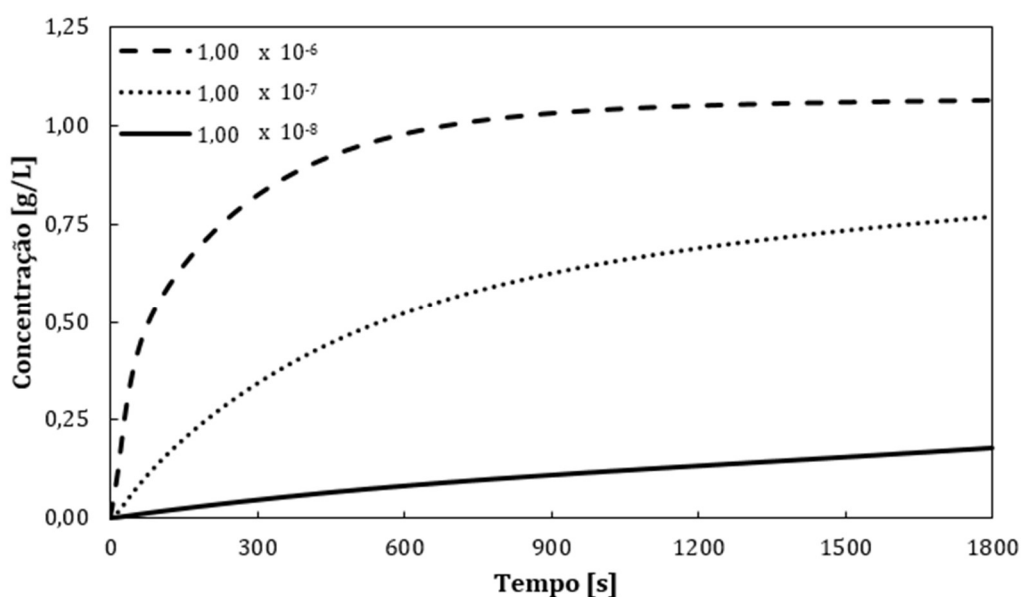


Figura 72 – Variação da concentração de detergente na sonda alterando apenas a vazão entre cesto e meio da sonda (\dot{V}_{C-N}).

O último parâmetro só foi ajustado para os casos em que o detergente foi inserido no tanque, isto porque se refere ao chamado volume morto descrito na seção 2.1.4. A vazão existente entre o tanque e o volume citado (\dot{V}_{T-VM}) tem as suas variações de concentração no cesto são apresentadas na Figura 73. A partir desta, observa-se que a velocidade para se atingir a condição estável depende fortemente da magnitude da vazão em análise visto que quanto maior esta for, maior será a intensidade da advecção e mais rapidamente se atingirá o equilíbrio. Ressalta-se que os primeiros segundos apresentam concentrações semelhantes porque se considerou que, no início, 60% da massa total foi direcionada para o volume morto (parâmetro X).

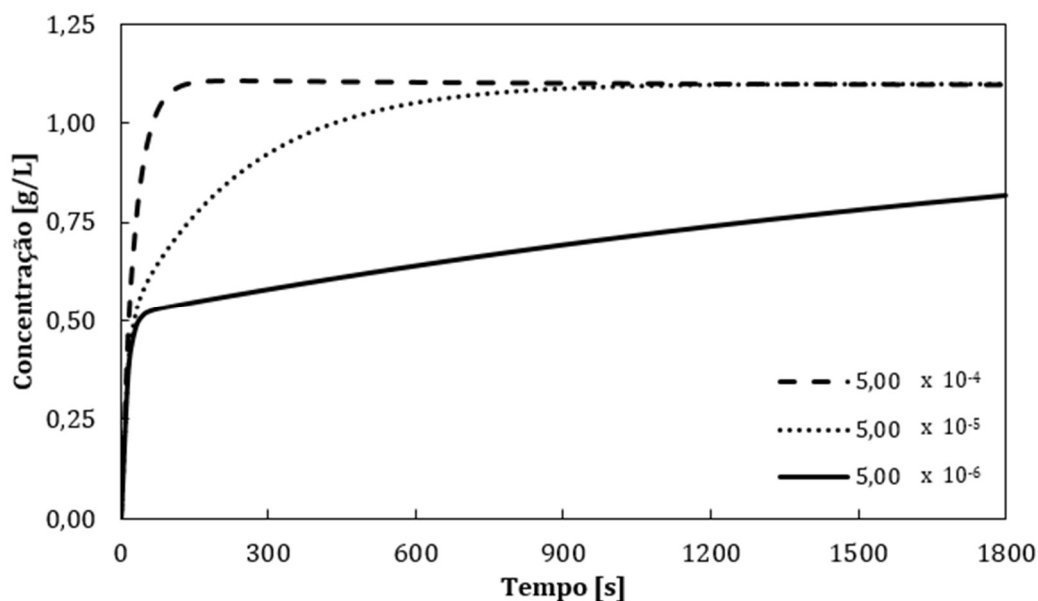


Figura 73 – Variação da concentração de detergente no cesto alterando apenas a vazão entre tanque e volume morto (\dot{V}_{T-VM}).

4.2.3 Considerações sobre a análise de sensibilidade do experimento fatorial relacionadas com parâmetros empíricos do modelo numérico

Conforme foi descrito no tópico 4.1.6, majoritariamente dois fatores foram significativos: inserção e agitação. Desse modo, buscou-se relacionar os resultados experimentais com parâmetros do modelo que influenciam no processo de transferência de massa.

A primeira consideração é referente ao diferente comportamento do conjunto ao se adotar intensidades de agitação forte ou fraca. São apresentados três exemplos a seguir. O primeiro é voltado para uma condição na qual o detergente foi inserido no tanque, cujos dados de concentração no tanque são apresentados na Figura 74. Nesta se observa que a condição com agitação forte atingiu a condição de equilíbrio consideravelmente mais rápido (aproximadamente 8 minutos) que a opção com nível suave de agitação (aproximadamente 30 minutos). Nos casos em questão, pelo fato de o detergente ter sido inserido no tanque, houve decantação no início. Desta forma, a advecção que determina a resposta do sistema é a entre tanque e volume morto (\dot{V}_{T-VM}). Através do modelo computacional, encontrou-se que a diferença de desse parâmetro entre os casos citados foi de aproximadamente 300% (dados presentes no Apêndice IX).

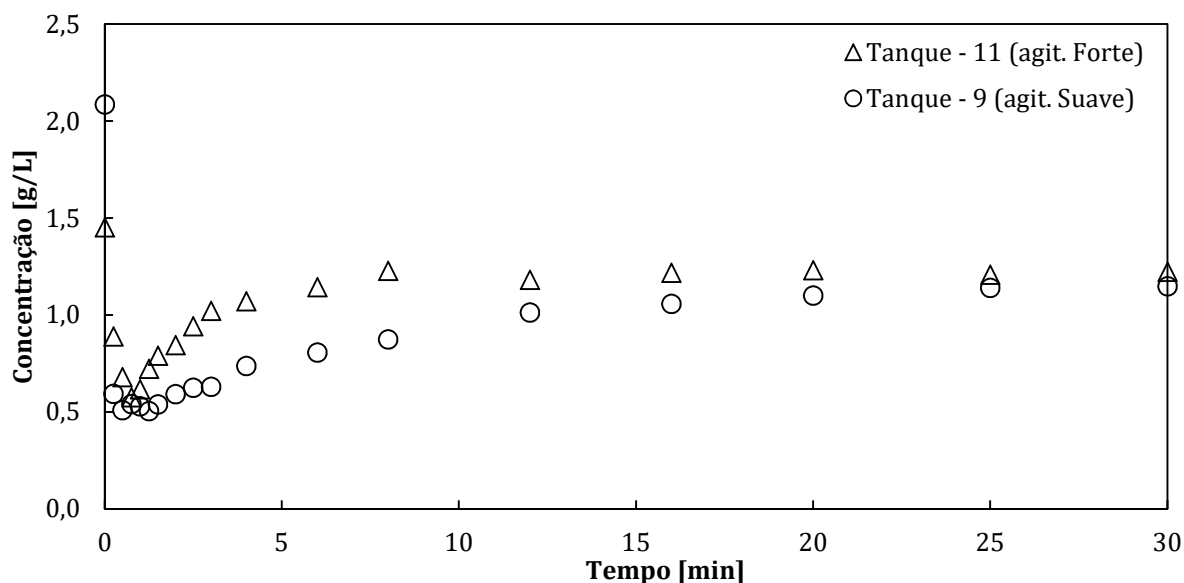


Figura 74 – Variação da concentração de detergente no tanque para duas condições com inserção no tanque, mas com diferentes níveis de agitação.

Já para casos nos quais a inserção foi no cesto, mostrado na Figura 75, a diferença para se atingir o equilíbrio no cesto entre as condições não é tão marcante visto que, mesmo na condição de intensidade suave, a estabilidade foi atingida em torno de 4 minutos. Nesses casos, pelo fato de não haver o volume morto, a advecção entre compartimentos se dá somente pela vazão entre tanque e cesto (\dot{V}_{T-C}). A diferença de magnitude observada deste parâmetro (Apêndice IX) entre as configurações mostradas na Figura 75 foi em torno de 200%.

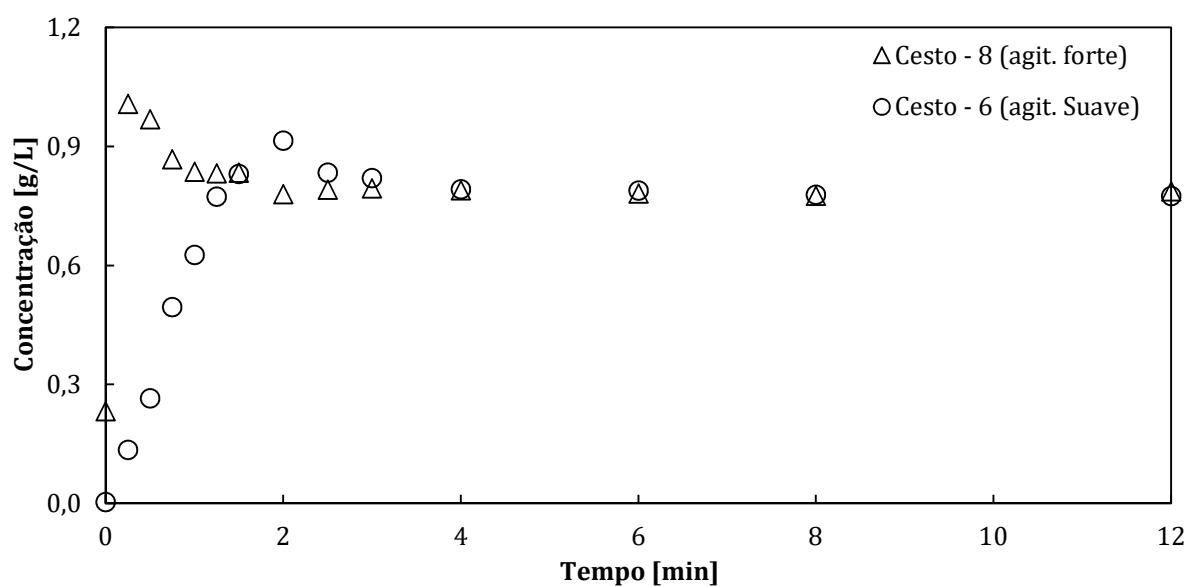


Figura 75 – Variação da concentração de detergente no cesto para duas condições com inserção no cesto, mas com diferentes níveis de agitação.

O último exemplo ainda referente à agitação é o comportamento da sonda, a qual mostrou variações de concentração bastante significativas, conforme se mostra na Figura 76. Conforme já discutido, esse tecido é regido tanto pela difusão (D_{ef}) no interior de suas camadas quanto pela advecção na camada do meio (\dot{V}_{C-N}). Para as condições apresentadas na Figura 76, obteve-se que as intensidades de agitação testadas afetaram em aproximadamente 200% a difusividade efetiva e em 500% a vazão entre cesto e interior da sonda comparando os valores apresentados no Apêndice IX.

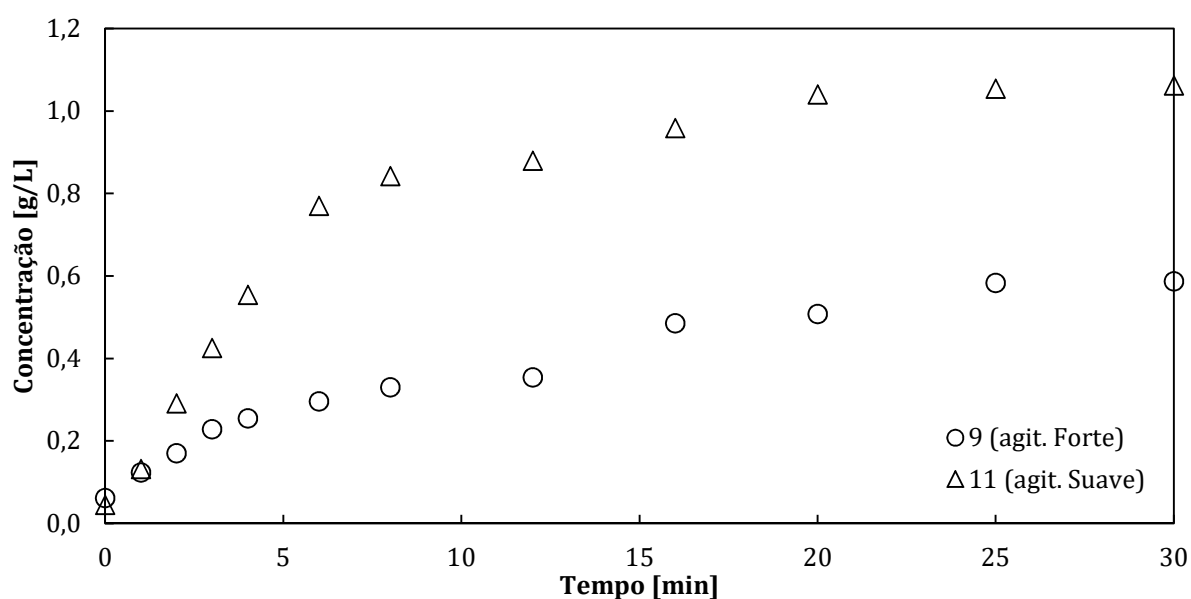


Figura 76 – Variação da concentração de detergente na sonda para duas condições com inserção no tanque, mas com diferentes níveis de agitação.

O outro fator a ser discutido é a inserção. Na Figura 77 é apresentado um comparativo de como a variação de concentração se comporta ao se mudar o local de inserção. Uma forma de quantificar a diferença existente entre ambas é analisar o quão longe o cesto está da condição de equilíbrio (0,75 g/L nos casos em questão) após 1 minuto de agitação. A partir disso, nota-se que os resultados foram 47% e 2% para inserção no tanque (3) e no cesto (4), respectivamente. Isto reforça a ideia de que, para se obter uma homogeneização mais rápida, recomenda-se a inserção no cesto.

Por fim, salienta-se que a sonda também é afetada pelo local de inserção do detergente cujo comportamento é mostrado na Figura 78. Conforme descrito na seção 2.1.4.5, existem dois parâmetros empíricos que regem a transferência de massa na sonda: a difusividade efetiva (D_{ef}) e a vazão entre cesto e o meio do tecido (\dot{V}_{C-N}). A partir dos ajustes realizados com o modelo computacional, cujos valores encontram-se no Apêndice IX, evidenciou-se que a parcela advectiva sofreu maiores variações (aproximadamente

75%). Assim, reforça-se a análise de sensibilidade dos parâmetros empíricos, onde a difusividade efetiva não se mostrou ser significativa.

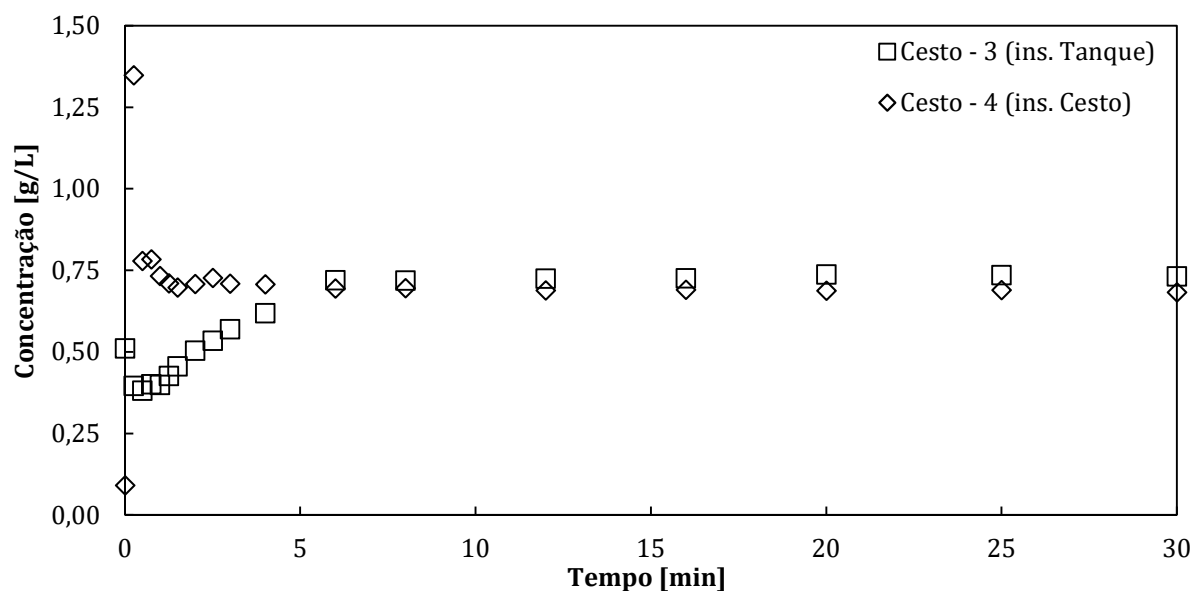


Figura 77 – Variação da concentração de detergente no cesto para duas condições com mesmo nível de agitação, mas com inserção em locais distintos.

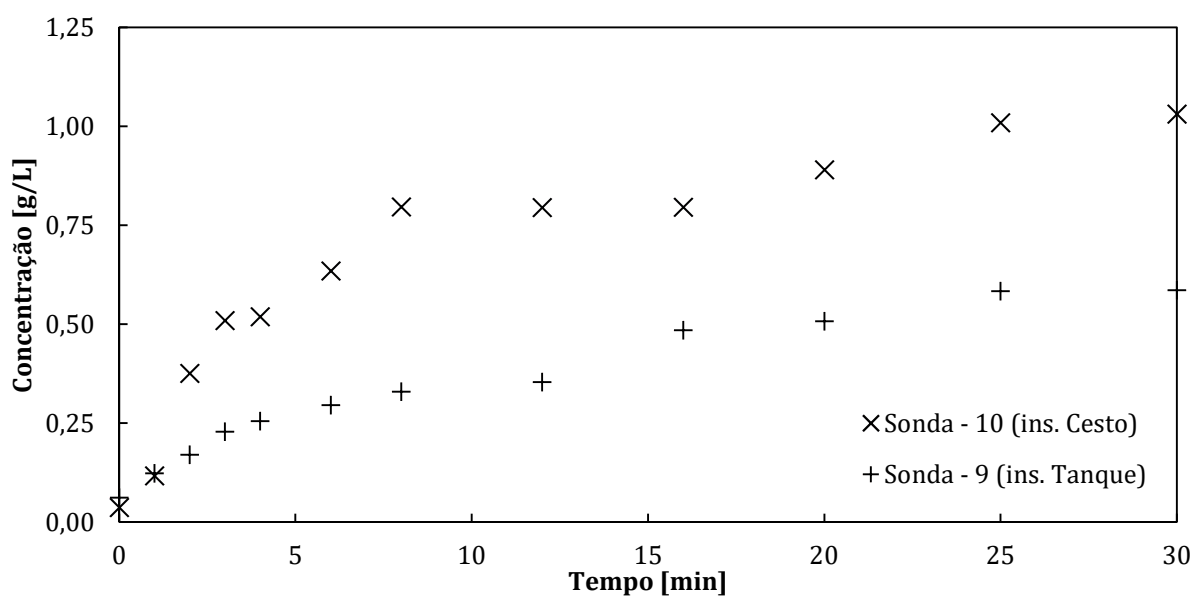


Figura 78 – Variação da concentração de detergente na sonda para duas condições com mesmo nível de agitação, mas com inserção em locais distintos.

4.2.4 Adaptação do modelo computacional para a previsão de diferentes combinações das variáveis de entrada do experimento fatorial

Com o modelo computacional validado em relação aos dados experimentais, o próximo estágio foi criar uma ferramenta para obter resultados das possíveis combinações das variáveis de entrada utilizadas no experimento fatorial. Isto foi feito a partir da inserção das superfícies geradas pela equação (40) para os parâmetros que foram alterados em todas as condições (\dot{V}_{T-C} , \dot{V}_{C-N} e D_{ef}). Já nos casos em que a inserção foi realizada no tanque, os dois parâmetros restantes (\dot{V}_{T-VM} e X) utilizaram a superfície dada pela equação (42), visto que somente 3 fatores variaram (agitação, volume e concentração). Dessa forma, pode-se escolher qualquer valor para a velocidade de agitação, volume e concentração inserida desde que estejam dentro dos limites testados no experimento fatorial.

Serão apresentados a seguir dois exemplos dessa ferramenta implementada. O primeiro deles trata de ampliar o entendimento sobre como a agitação interfere na variação da concentração. Na Figura 79, é apresentado um comparativo da concentração de detergente na sonda em relação à velocidade de agitação variando de 70 (suave) a 100 (forte) rpm em intervalos de 10 rpm. Considerou-se nesse comparativo que a inserção do detergente foi feita no tanque, o volume de água disponível foi de 80 litros e adotou-se uma concentração de 1 grama por litro. Nota-se o comportamento já previsto nas outras análises apresentadas, ou seja, quanto maior a velocidade de agitação (advecção mais intensa), maior será a concentração de detergente presente na sonda. Vale destacar que a diferença da resposta entre 70 e 80 rpm é maior que entre 90 e 100, o que indica uma relação não linear entre os fatores em questão. O não atingimento da concentração inserida, ou seja, 1 g/L, está relacionado com o fato de ainda haver massa de detergente decantada no fundo do tanque.

O segundo exemplo é direcionado às variações de concentração de detergente no cesto e na sonda ao se alterar apenas o local de inserção do mesmo. Mostra-se o resultado fornecido pelo modelo numérico na Figura 80. Mantiveram-se fixos o volume de água em 80 litros e a velocidade de agitação em 85 rpm. É evidente que a variação no cesto é bastante diferente entre as condições de inserção principalmente nos primeiros 600 segundos. Isto ocorre pois, ao se inserir o detergente no tanque, é preciso que ele seja transferido ao cesto por advecção. Neste caso, ainda há detergente não dissolvido no

fundo do tanque, por isso há um distanciamento praticamente constante a partir de 600 segundos. Analisando-se agora a concentração do insumo presente na sonda observa-se que ambas se aproximaram, até 600 segundos, das suas respectivas curvas do cesto numa velocidade maior que a partir desse momento. Isto é uma evidência de que a difusão é fator determinante para o total equilíbrio entre a sonda e o meio na qual está inserida.

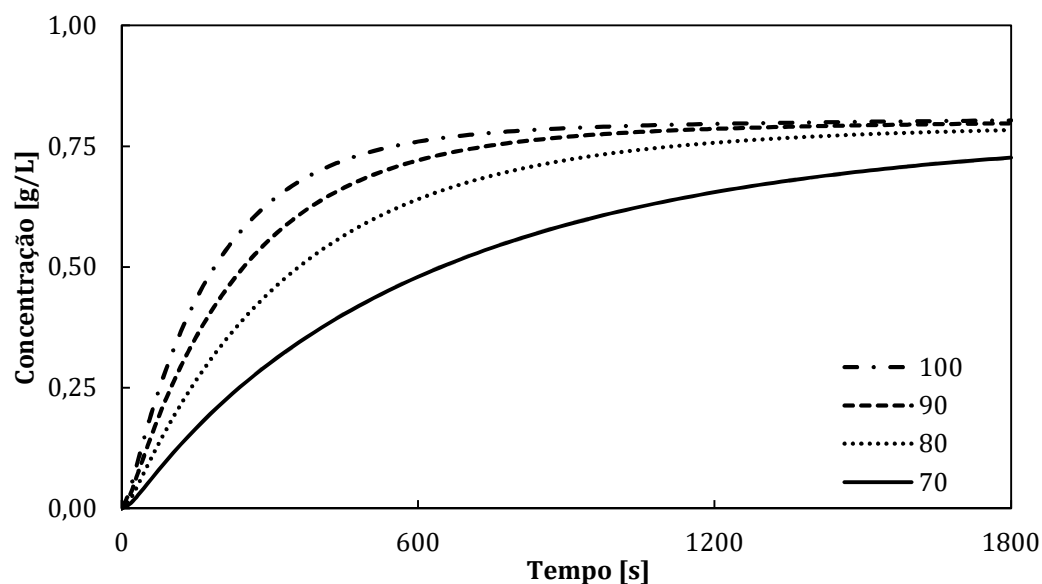


Figura 79 – Variação da concentração na sonda ao se alterar a velocidade de agitação com inserção de detergente no tanque (obtida através do modelo numérico).

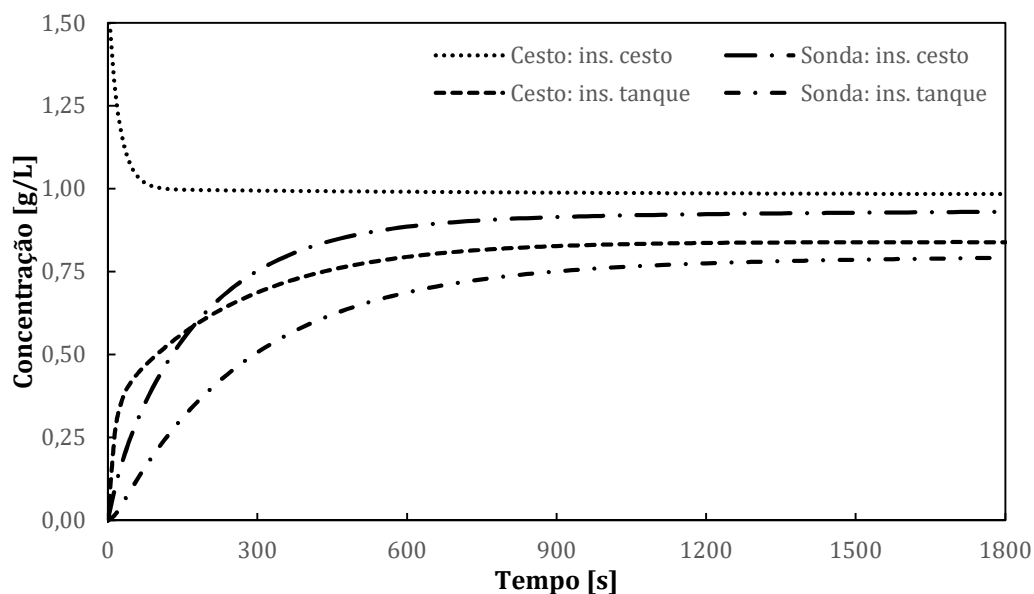


Figura 80 – Variação da concentração na sonda e no cesto ao se alterar o local de inserção de detergente (obtidas através do modelo numérico).

5 CONCLUSÕES

5.1 CONCLUSÕES FINAIS

A partir da revisão da literatura encontrada, observou-se a escassez de trabalhos na área de lavanderia aplicada a lavadoras de eixo vertical. Sendo assim, foi desenvolvida uma metodologia de testes, bem como um modelo computacional capaz de simular a transferência de detergente em lavadora de eixo vertical. As conclusões obtidas com cada uma dessas etapas serão apresentadas a seguir:

- Quanto à metodologia desenvolvida:

Através da necessidade de se conhecer a variação de concentração de detergente e de como essa variável de interesse poderia ser modelada, não se encontrou um procedimento normalizado. Por conseguinte, decidiu-se desenvolver um procedimento que atendesse à tal necessidade, mas que, sempre que possível, estivesse atrelado à algum padrão. Fez-se necessário utilizar outras propriedades e correlacioná-las com a concentração. Através de séries de testes, conseguiu-se coletar amostras em locais representativos e com meios que não interferissem demasiadamente no escoamento. Foram avaliados diferentes materiais, sondas e equipamentos para que as coletas conseguissem ser obtidas. Notou-se a existência de efeitos como a decantação e a importância da agitação no processo de mistura. Tais constatações serviram de subsídio para a execução de testes durante a atual pesquisa e servirão de referência para futuras investigações a serem realizadas na arquitetura das máquinas estudadas.

- Quanto ao experimento fatorial:

O experimento fatorial foi de fundamental importância para identificar quais parâmetros são significativos no transporte de detergente. Procurou-se utilizar fatores próximos às aplicações práticas e de interesse da indústria. Os níveis utilizados foram embasados em aplicações reais de lavadoras de eixo vertical. Os resultados encontrados levaram a algumas constatações:

- Há ocorrência de decantação em todas as configurações cuja inserção do detergente foi feita no tanque. Isto foi ainda mais evidente nas situações de com agitação fraca, nas quais a concentração inserida não foi atingida. Observa-se, a partir desses experimentos, a importância da advecção na homogeneização da mistura.
- A inserção e a agitação foram os parâmetros mais significativos. Para se obter uma homogeneização rápida, a melhor combinação é a inserção no cesto e agitação forte.
- A escolha de concentração como uma variável de entrada não foi adequada, pois é dependente de outro fator que é o volume d'água.

Os dados obtidos no experimento fatorial serviram tanto para mostrar quais parâmetros são significativos como para validar o modelo numérico.

- Quanto ao modelo numérico:

O uso de simulação numérica permite uma melhor compreensão dos impactos gerados por alterações em parâmetros operacionais. Isto só pode ser feito com segurança se os modelos computacionais tiverem sido validados. Esta etapa foi realizada utilizando-se os experimentos fatoriais apresentados. Sendo assim, o modelo numérico desenvolvido, à luz das equações diferenciais ordinárias de transferência de massa, levou às seguintes conclusões:

- Tanto a localização do ponto de coleta das amostras quanto o tempo entre a inserção do detergente e o início da agitação fazem com que o modelo não capture bem as variações dos primeiros instantes principalmente para condições de golpe suave e inserção no cesto. De todo modo, para a maior parte dos casos, as previsões numéricas seguiram as tendências experimentais nas condições com e sem decantação.
- Para os parâmetros empíricos do modelo, a agitação foi o fator que se mostrou como sendo mais significativo. Além disso, observou-se que as três vazões de ajuste impactaram de diferentes formas na variação da concentração de detergente no cesto e na sonda.
- A partir das superfícies encontradas da análise de sensibilidade do modelo numérico, foi possível adaptar o modelo de forma que seja possível

estudar diferentes combinações dos parâmetros. Todavia, os valores a serem avaliados devem estar dentro dos intervalos testados no experimento fatorial.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Existem diversas melhorias e avanços que podem vir a ser pesquisados na área de lavanderia doméstica. A presente dissertação é um trabalho de base para que, a partir deste, ocorram evoluções no entendimento dos fenômenos de transporte de detergente. As diferentes frentes de trabalho são apresentadas separadamente a seguir.

- Avanços nos modelos físicos e numéricos:

Sugere-se que sejam investigados modelos locais que levam em conta o comportamento da roupa, tais como a porosidade e permeabilidade do meio. O trabalho de Gooijer (1998) apresenta diferentes tipos de abordagens que podem ser utilizadas de referência. Seguindo o mesmo intuito de se ter um modelo mais completo, cada um dos parâmetros ajustados neste trabalho (apresentados na seção 4.2) pode vir a ter submodelos específicos.

A pesquisa atual foi direcionada para o transporte de detergente em lavadoras, mas não foi modelada a reação química deste componente com sujeiras que possam existir nos tecidos. Pode-se, dessa forma, estudar a transferência de massa de uma sujidade isoladamente e/ou aderida com detergentes. Além disso, uma abordagem complementar poderia ser direcionada ao detergente e quais dos seus componentes são fatores determinantes para o processo de transferência de massa bem como o uso de diferentes tipos desse insumo.

Outra oportunidade é estudar modelos relacionados à mecânica dos tecidos, ou seja, sua estrutura, deformações, influência do tipo de fibra usada etc. Complementarmente, julga-se ser interessante relacionar não só a transferência de massa com a mecânica do tecido, mas também com outros fenômenos que existem dentro da lavadora como efeitos térmicos e transferência da quantidade de movimento.

- *Avanços na metodologia e experimentos:*

Considerando a metodologia apresentada, há uma série de melhorias nos experimentos para diminuir o esforço na execução e aumentar a quantidade de informações extraídas. Apresenta-se abaixo uma lista das possibilidades:

- Automação das coletas: diminuir a influência do fator humano neste processo e, com isso, conseguir rastrear mais pontos de interesse com maior robustez e diminuir o tempo de leitura das amostras. Caso contrário, optar por instrumentos com larga faixa de análise, diminuindo ou eliminando a necessidade de diluição das amostras.
- Revisão da construção e utilização das sondas: talvez existam outros tipos de cola mais resistentes, mas, ao mesmo tempo, flexíveis. Outras frentes são, por exemplo, utilizar mais de uma sonda para o mesmo teste; desenvolver sondas com menos camadas que garantam a repetitividade; criar um dispositivo que facilite a remoção de detergente das sondas, principalmente aquelas com várias camadas.
- Parâmetros a serem investigados: existem diversas possibilidades que não foram abordadas nessa pesquisa tais como a geometria do agitador (*e.g.*: número e formato das pás), tipo de tecido (*e.g.*: sintético), tamanho e capacidade de absorção dos tecidos, arquitetura da lavadora (*e.g.*: tamanho do cesto), uso de recirculação da água, inserção do detergente via alimentador da lavadora, entre outros.
- Utilizar uma estrutura transparente: a visualização da movimentação dos tecidos seria facilitada se tanto o tanque quanto o cesto fossem produzidos em materiais translúcidos e com uma estrutura perfilada para substituir o gabinete.
- Adaptar a metodologia (ou desenvolver uma semelhante) para condições em que os tecidos não ficam submersos: existem mercados com lavadoras ditas de alta performance nas quais a quantidade de água utilizada é substancialmente menor em relação às configurações adotadas na atual pesquisa.

- Avanços do estudo em lavanderia:

Existem outras frentes que envolvem lavanderia e que aumentariam o domínio desta área, das quais, destacam-se duas possibilidades. A primeira seria propor formas de quantificar a influência do detergente na remoção de diferentes sujeiras em lavadoras domésticas. Vale lembrar, conforme destacado no item 1.1, que esse processo de limpeza depende de outros fatores além da química.

A segunda vertente sugerida refere-se a um estudo específico para rastrear a posição dos tecidos em lavadoras de eixo vertical, semelhantemente ao trabalho feito por Ward (2001). A localização dos mesmos é um fator não controlado, mas que influencia tanto a ação mecânica quanto a química.

REFERÊNCIAS

AHAM, 2010. **Performance Evaluation Procedures for Household Clothes Washers: AHAM HLW-1-2010**. Association of Home Appliance Manufacturers, Washington DC, USA.

AKCABAY, D.T., 2007. **Physics based Washing Machine Simulations**. PhD Thesis, University of Michigan, USA.

AS/NZS 2040.1, 2005. **Performance of household electrical appliances – Clothes washing machines, Part 1: Methods for measuring performance, energy and water consumption**. Standards Australia, Sydney e Standards New Zealand, Wellington.

BASQUES, J.C., 2010. **Fotometria e Padronização**. Labtest Diagnóstica SA.

BOGACKI, P., SHAMPINE, L.F., 1989. **A 3(2) pair of Runge-Kutta formulas**. Applied Mathematics Letters 2 (4), pp 321-325.

BRUNO, A.N., 2014. **Biologia I: Princípios e Métodos**. Artmed, Porto Alegre, Brasil.

CASELLA, G., BERGER, R.L., 2010. **Inferência Estatística**. Cengage Learning.

CHARRETTE, H., HOUZELOT, J.L., VENTENANT, V., 2001. **Modelling and Experimental Studies of Mass Transfer in Cotton Fabrics**. Textile Research Journal, 71 (11): 954-959.

de BONNEVILLE, F., 1998. **The Book of the Bath**. Random House Incorporated.

EGER, R.S., 2010. **Modelação de escoamentos turbulentos sob a ação de rotação alternada**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil.

EPA, 2014. **Water: Monitoring & Assessment – 5.9 Conductivity**. Disponível em: <<http://water.epa.gov/type/rsl/monitoring/vms59.cfm>>. Acesso em: 21 set. 2014.

FUENTES, J., 2011. **Samsung investe US\$300 milhões**. Disponível em <<http://www.valor.com.br/empresas/1011338/samsung-investe-us-300-milhoes>>. Acesso em: 15 nov. 2013.

GOOIJER, H., 1998. **Flow Resistance of Textile Materials**. PhD thesis. University of Twente, The Netherlands.

GOMES, F.M., 2011. **Detergentes**. Disponível em <<http://www.dequi.eel.usp.br/~fabricio/detergente.pdf>>. Acesso em: 08 nov. 2013.

HESBENEFITINGPEOPLE, 2014. **Types of Washing Machine: Automatic Top-Loading**. Disponível em <<http://www.hesbenefitingpeople.com/types-of-washing-machine>>. Acessado em: 15 mar. 2014.

INCROPERA, F.P, DEWITT, D.P, BERGMAN, T.L., LAVINE, A.S., 2008. **Fundamentos da Transferência de Calor e de Massa**. LTC, Rio de Janeiro, Brasil.

KLING, W., LANGE, H, 1960. **Theory of the Washing Process**. The Journal of the American Oil and Chemists Society. Vol. XXXVIII, No. 1: 30-32.

LEVENSPIEL, O., 1998. **Chemical Reaction Engineering**. 3rd Edition. John Wiley&Sons, USA.

LG, 2015. **Manual do Usuário**: Máquina de lavar roupa: WD1485AT. Página 6.

LIRA, S.A., 2013. **Planejamento de Experimentos**. Apostila do curso de pós-graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Paraná.

LOVE, A.E.H., 1944. **A Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity**. 4th Edition. Dover Publications.

MACHADO JR., D., 2014. **Estudo experimental do escoamento periódico de água em lavadoras de eixo vertical**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Paraná.

MAXWELL, L., 2009. **Who Invented the Electric Washing Machine? An Example of how the Patents are misused by Historians**.

MATSUI, H., KOBAYASHI, M., KAZUHIRO, K., 1976. **Washing of Fabrics - Part 1: Washing of Cotton Fabrics and its Theoretical Analysis**. Journal of the Textile Machinery Society of Japan 29 (8): T108-118.

MATSUI, H., MORIYAMA, K., FUKUOKA, S., 1977. **Washing of Fabrics - Part 2: Analysis of Material Transfer in Fiber Assembly based on Diffusion Theory**. Journal of the Textile Machinery Society of Japan 30 (12): T214-222.

METTLER TOLEDO, 2015. **FE30 - FiveEasy™ Conductivity**. Disponível em <http://sg.mt.com/sg/en/home/products/Laboratory_Analytics_Browse/pH/benchtop_meter/FiveEasy/FE30_FiveEasy_Conductivity.html>. Acesso em: 10 mar. 2015.

PESKIN, C.S., 1972. **Flow patterns around heart valves - numerical method**. Journal of Computational Physics 172 (2): 917-923.

P&G, 2008. **Technology of Laundry Detergents**. Alliance Innovation Team.

SCIENCELEARN, 2012. **Surfactants**. Disponível em <<http://sciencelearn.org.nz/Science-Stories/Where-Land-Meets-Sea/Sci-Media/Images/Surfactants>>. Acesso em: 13 jul. 2015.

SÉRGIO, A., DUARTE J., RELVAS C., MOREIRA R., FREIRE R., FERREIRA J.L., SIMÕES J.A., 2003. **The design of a washing machine prototype**. Materials and Design 24: 331 - 338.

SIMPSON, 2015. **EZI Set Top Load Washer - SWT7542**. Disponível em <<http://www.simpson.com.au/Product?model=SWT7542&categoryGuid=B39084BD-E1B9-48D4-B783-C92C2F5B83B4>>. Acesso em: 06 abr. 2015.

SOLIS, S., 1531. **Das große Waschfestvor der Stadt**. Nuremberg.

SOUSA, R., 2011. **Espectrofotometria no UV-Vis**. Disponível em <[http://www.ufjf.br/baccan/files/2011/07/Aula-10-ESPECTROFOTOMETRIA- 2S-2011-PARTE-1-Modo-de-Compatibilidade.pdf](http://www.ufjf.br/baccan/files/2011/07/Aula-10-ESPECTROFOTOMETRIA-2S-2011-PARTE-1-Modo-de-Compatibilidade.pdf)>. Acesso em 10 mar. 2015.

ST. LAURENT, J.B., de BUZZACCARINI, F., de CLERCK, K., DEMEYERE, H., LABEQUE, R., LODEWICK, R., van LANGENHOVE, L., 2007. **Handbook for Cleaning/Decontamination of Surfaces: B.1.I - Laundry Cleaning of Textiles**. Volume 1. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.

STALMANS, M., 2008. **History of Washing**. Science in the box series, Procter and Gamble. Brussels, Belgium.

van den BREKEL, L.D.M., 1987. **Hydrodynamics and Mass Transfer in domestic drum-type fabric Washing Machine**. PhD thesis. Technical University Delft, The Netherlands.

van der DONCK, J.C.J., 1997. **Compression of wet textile**. Tenside Surfactants Detergents 34: 322-326.

van WYK, C.M., 1946. **20 - Note on the Compressibility of Wool**. Journal of Textile Institute Transactions, 37 (12): 285-292.

von RYBINSKI, W., 2007. **Handbook for Cleaning/Decontamination of Surfaces: A - Physical Aspects of Cleaning Process**. Volume 1. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.

WARD, D., 2001. **Wash Load Motion: A Theoretical Approach and Experimental Analysis**. 52nd International Appliance Technical Conference, Ohio State University, USA.

WARD, D., 2003. **A novel remote measurement and monitoring system for the measurement of critical washing parameters inside a domestic washing machine**. Measurement 34: 193-205.

WARMOESKERKEN, M.M.C.G, van der VLIST, P., MOHOLKAR, V.S., NIERSTRASZ, V.A., 2002. **Laundry Process Intensification by Ultrasound**. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 210: 277-285.

WU, C.F.J., HAMADA, M.S., 2009. **Experiments planning, analysis and optimization**. 2nd Edition, John Wiley & Sons.

YEE, R.P., 2013. **Simulação numérica do escoamento bifásico em máquinas de lavar de eixo vertical**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Paraná.

APÊNDICE I – DEDUÇÕES DAS EQUAÇÕES GOVERNANTES DA SONDA

Na seção 2.1.4.5 foram apresentadas as equações que regem a transferência de massa nas diferentes partes da sonda. Essas serão deduzidas no presente Apêndice.

Considerando a primeira camada apresentada na Figura 81:

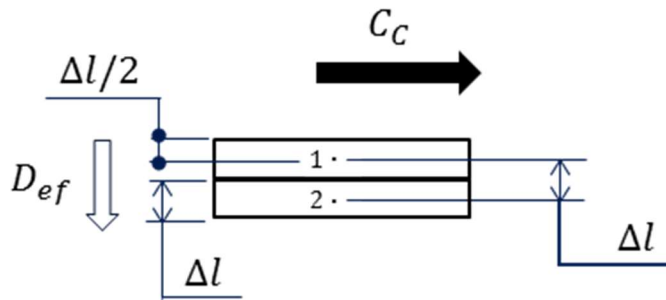


Figura 81 – Representação esquemática da primeira camada da sonda.

Foram adotadas as seguintes hipóteses:

- Não há termo fonte;
- A difusividade pode ser considerada constante;
- No interior da sonda só há difusão;
- Não há fluxo entre o último “nó” do tecido e o líquido no meio da sonda;
- A concentração na superfície superior é igual à concentração do líquido do cesto;
- Os volumes dos elementos são constantes;
- O fluxo é unidimensional.

Tais considerações foram aplicadas na equação (11) e então se obteve:

$$\frac{dC}{dt} = \left[\frac{d(uC)}{dx} \right] + D_{ef} \left[\frac{d^2C}{dx^2} \right] \quad (43)$$

Considerando que a vazão volumétrica é definida por:

$$\dot{V} = uA \quad (44)$$

onde u é a velocidade e A é a área.

Isolando-se a velocidade obtém-se:

$$u = \frac{\dot{V}}{A} \quad (45)$$

Em contrapartida o volume pode ser expresso por:

$$V = Ax \quad (46)$$

onde x corresponde à distância. Na equação (47) ao se isolar a distância, chega-se em:

$$x = \frac{V}{A} \quad (47)$$

Substituindo a equação (46) e (48) em (44), obtém-se:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{\dot{V}}{V}[\Delta C] + D_{ef} \left[\frac{d^2 C}{dx^2} \right] \quad (48)$$

Aplicando a equação (49) para o caso apresentado na Figura 81, chega-se em:

$$\frac{dC_1}{dt} = \frac{\dot{V}_{C-S}}{V_S} (C_C - C_1) + \frac{D_{ef}}{\Delta x} \left[\frac{\Delta C}{\Delta x} \Big|_{norte} - \frac{\Delta C}{\Delta x} \Big|_{sul} \right] \quad (49)$$

onde S é o índice da sonda, C é o índice do cesto, 1 refere-se à primeira camada.

Adotou-se que a vazão volumétrica da sonda corresponde a uma parte da vazão que vai para os tecidos (índice O), de forma que:

$$\dot{V}_{C-S} = (1 - \alpha) \dot{V}_{C-O} \quad (50)$$

Além disso, as variações espaciais de concentração são descritas como sendo, para o caso da primeira camada:

$$\frac{\Delta C_1}{\Delta x} \Big|_{norte} = \left(\frac{C_C - C_1}{\frac{\Delta l}{2}} \right) \quad (51)$$

$$\frac{\Delta C_1}{\Delta x} \Big|_{sul} = \left(\frac{C_1 - C_2}{\Delta l} \right) \quad (52)$$

Considerou-se na equação (52) que a concentração na superfície superior da sonda a mesma presente no cesto.

Substituindo as equações (51), (52) e (53) em (50), chega-se em:

$$\frac{dC_1}{dt} = \frac{(1 - \alpha) \dot{V}_{C-O}}{V_S} (C_C - C_1) + \frac{D_{ef}}{\Delta l} \left[\frac{2(C_C - C_1)}{\Delta l} - \frac{(C_1 - C_2)}{\Delta l} \right] \quad (53)$$

Ou, mais simplificadaamente:

$$\frac{dC_1}{dt} = \frac{(1 - \alpha) \dot{V}_{C-O}}{V_S} (C_C - C_1) + \frac{D_{ef}}{\Delta l^2} (2C_C + C_2 - 3C_1) \quad (28)$$

Para uma camada intermediária da sonda (ver Figura 82), não há mais a ação advectiva na transferência de massa.

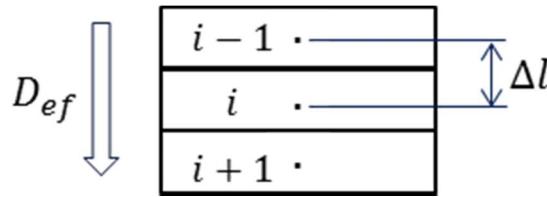


Figura 82 – Representação esquemática de uma camada intermediária da sonda.

Assim, a equação (49) será reduzida considerando apenas o termo difusivo, de forma a se obter:

$$\frac{dC_i}{dt} = D_{ef} \left[\frac{d^2 C_i}{dx^2} \right] \quad (54)$$

As variações espaciais de concentração para este caso são definidas por:

$$\left. \frac{\Delta C_i}{\Delta x} \right|_{norte} = \left(\frac{C_{i+1} - C_i}{\Delta l} \right) \quad (55)$$

$$\left. \frac{\Delta C_i}{\Delta x} \right|_{sul} = \left(\frac{C_i - C_{i-1}}{\Delta l} \right) \quad (56)$$

Substituindo as equações (56) e (57) em (55), chega-se em:

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{D_{ef}}{\Delta l^2} (C_{i-1} + C_{i+1} - 2C_i) \quad (29)$$

Por fim, a camada do meio da sonda é mostrada na Figura 83.

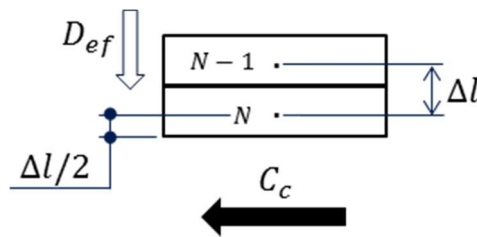


Figura 83 – Representação esquemática da camada do meio da sonda.

Novamente partindo da equação (49), considerou-se a hipótese de que a concentração no nó do último volume de controle (camada) é a mesma da sua superfície inferior da sonda. Deste modo, obteve-se:

$$\left. \frac{\Delta C_N}{\Delta x} \right|_{norte} = \left(\frac{C_{N-1} - C_N}{\Delta l} \right) \quad (57)$$

$$\left. \frac{\Delta C_N}{\Delta x} \right|_{sul} = \left(\frac{C_N - C_S}{\frac{\Delta l}{2}} \right) = 0 \quad (58)$$

No caso em análise, a parcela advectiva é definida por:

$$\frac{\dot{V}}{V} [\Delta C] = \frac{\dot{V}_{C-N}}{V_S} (C_C - C_N) \quad (59)$$

Ao se substituir as equações (58), (59) e (60) em (49), obtém-se:

$$\frac{dC_N}{dt} = \frac{\dot{V}_{C-N}}{V_S} (C_C - C_N) + \frac{D_{ef}}{\Delta l^2} (C_{N-1} - C_N) \quad (30)$$

APÊNDICE II – FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA

Citou-se na seção 3.2 como também na 3.9, o uso de funções de transferência entre a absorbância e a concentração de detergente. Serão aqui apresentados os valores utilizados para cada configuração testada.

Para se obter altos valores de R^2 , o ponto chave observado é a separação da massa de detergente a ser inserido nas concentrações estipuladas. Deve-se procurar atingir valores os mais próximos possíveis ao desejado bem como evitar pequenas pedras (maior dificuldade para diluir).

Os coeficientes angular (A) e linear (B) da reta que definem a função de transferência bem como os valores de R^2 são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Coeficientes das funções transferência adotadas no experimento fatorial.

Número do Teste	A	B	R^2
1	0,25211	-0,02649	0,99941
2	0,21949	0,01893	0,99415
3	0,23529	-0,01932	0,99706
4	0,20932	-0,00103	0,99927
5	0,21922	-0,04937	0,99887
6	0,23469	-0,02453	0,99815
7	0,21488	0,00923	0,99859
8	0,22525	-0,02234	0,99951
9	0,24300	-0,03251	0,99834
10	0,24293	0,00059	0,99965
11	0,23955	-0,02112	0,99971
12	0,23390	-0,01261	0,99979
13	0,24868	0,01244	0,99944
14	0,23371	0,00609	0,99943
15	0,24266	-0,01739	0,99977
16	0,21997	0,01545	0,99835

APÊNDICE III – MODELOS DOS INSTRUMENTOS UTILIZADOS

Durante as discussões sobre a medição indireta da concentração (seção 3.2), mencionou-se que foram usados equipamentos de medição durante os ensaios. Esses são apresentados em maior detalhe a seguir.

O condutivímetro utilizado para a realização das medições é da marca Mettler Toledo, modelo Five Easy™ FE30 com eletrodo modelo LE703, cuja extensão de leitura é de 10 μ S/cm a 200mS/cm e erro de $\pm 0,5\%$ do valor medido.

Já as medições da absorbância foram realizadas através do uso de espectrofotômetros de raios ultravioleta. O modelo utilizado é o Spectronic Genesys 6 da fabricante ThermoEletron, faixa de leitura de -0,1 a 3 com precisão de 0,5%.

A balança para a medição da massa é da marca Shimadzu, modelo AY220 com faixa de leitura de 0 a 220 gramas, massa mínima de 0,1mg e desvio padrão menor ou igual a 0,1mg.

APÊNDICE IV – ANÁLISE DAS INCERTEZAS

A questão das incertezas foi abordada nas seções 3.5, 3.9.4 e 4.2 e será detalhada neste Apêndice.

Considerando a incerteza relativa aos sistemas de medição, as variações estariam atreladas aos erros dos instrumentos citados no Apêndice III. Nota-se que os erros são menores que 1% e, por isso, serão desconsiderados.

Em contrapartida, o lado operacional possui diversas fontes de ruído tais como: diferença de tempo entre o tempo de coleta e o operador succionar a amostra, forma de inserção dos tecidos na bancada, diluição das amostras com concentrações elevadas (fora da escala de leitura do espectrofotômetro), entre outros.

Para se obter um valor que representasse a incerteza operacional, analisaram-se os resultados de três repetições feitas na condição máxima (todos os fatores no nível positivo) do experimento fatorial, apresentado na Figura 84. Realizou-se um comparativo das diferenças encontradas entre as repetições, mostrado na Tabela 7. A partir desta, obteve-se uma variação média de leitura em torno de 15% em módulo e esse foi o valor adotado nos gráficos comparativos entre os dados experimentais e o modelo numérico (seção 4.2 e Apêndice VIII).

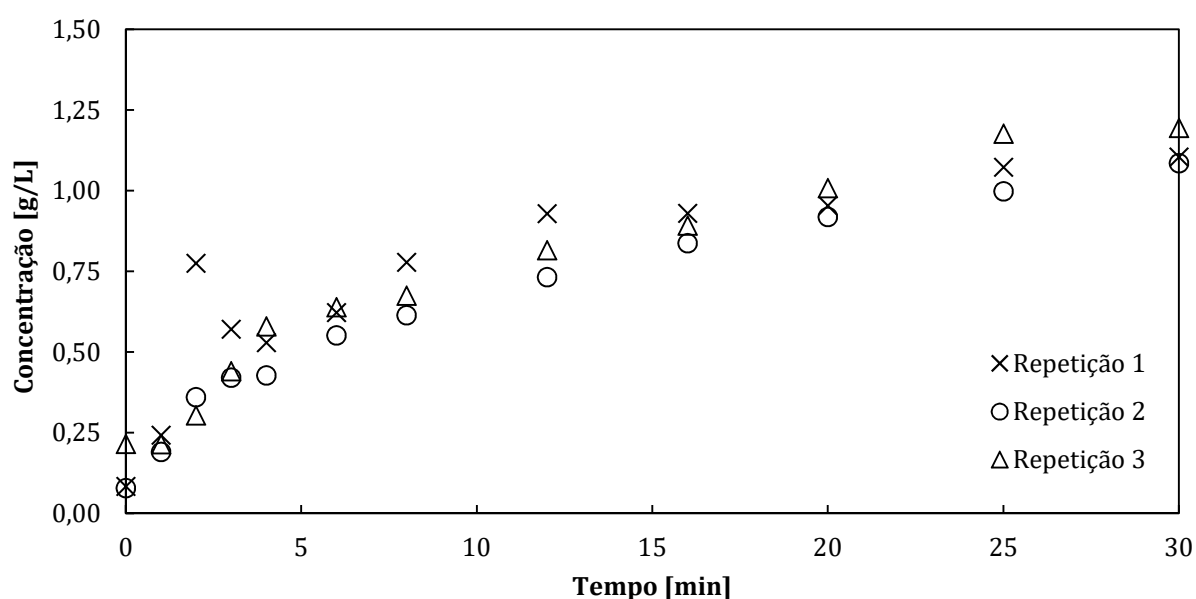


Figura 84 – Variação da concentração de detergente na sonda na condição máxima em 3 repetições realizadas.

APÊNDICE V – RESULTADOS DO EXPERIMENTO FATORIAL

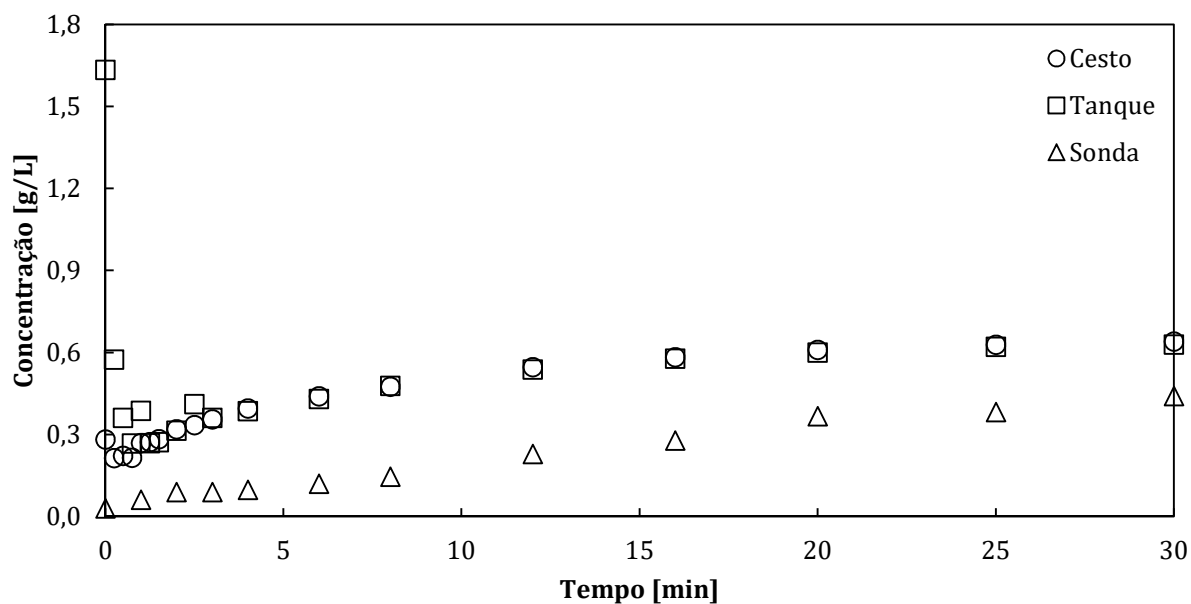


Figura 85 – Dados do experimento fatorial: ensaio 1^{xv}.

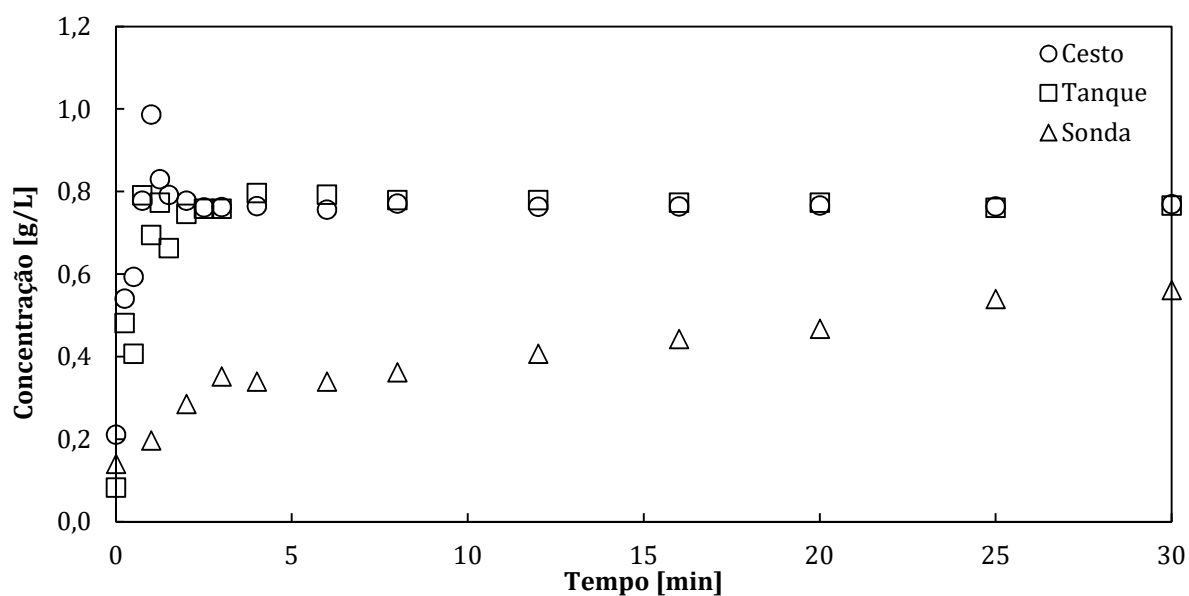


Figura 86 – Dados do experimento fatorial: ensaio 2^{xvi}.

^{xv} Condição 1: inserção no tanque, agitação suave, volume de 70 litros, concentração de 0,75 g/L.

^{xvi} Condição 2: inserção no cesto, agitação suave, volume de 70 litros, concentração de 0,75 g/L.

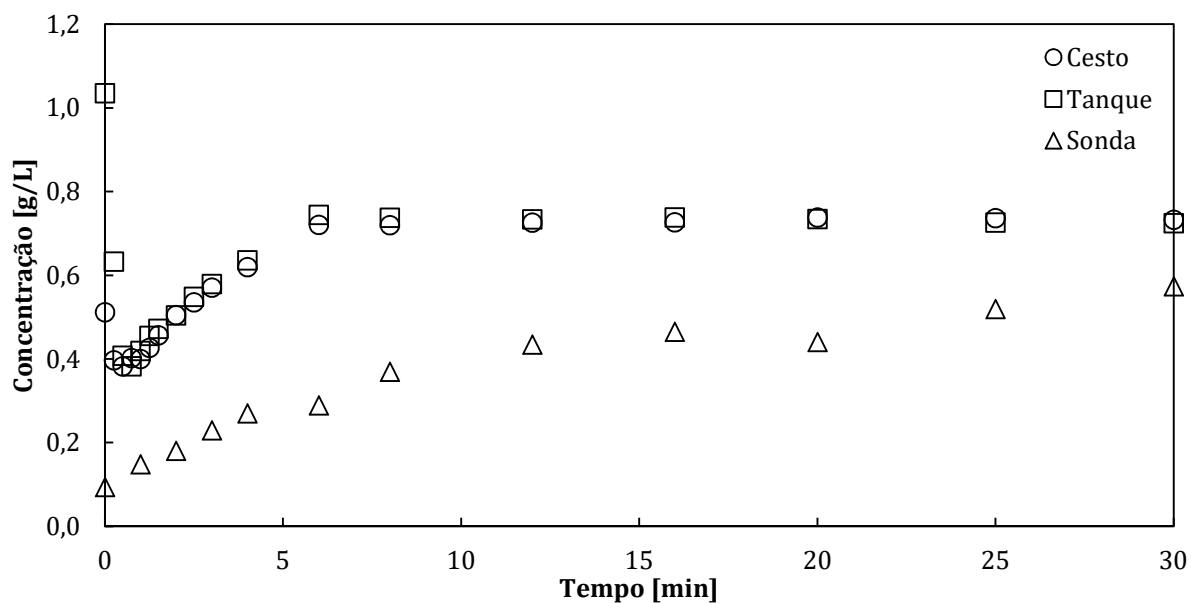


Figura 87 – Dados do experimento fatorial: ensaio 3^{xvii}.

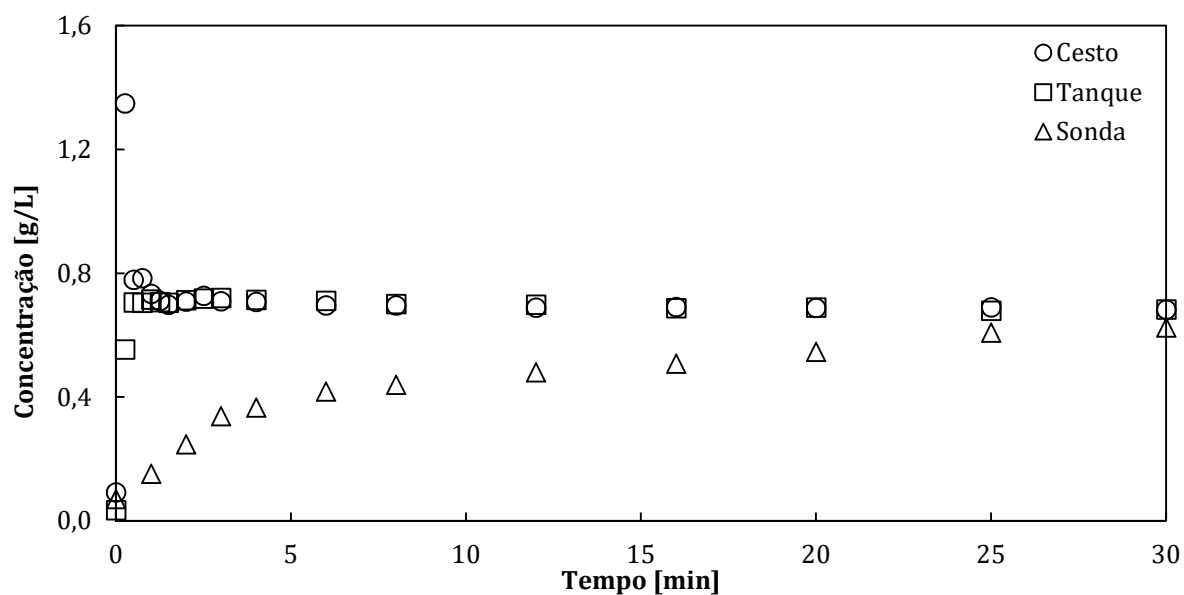


Figura 88 – Dados do experimento fatorial: ensaio 4^{xviii}.

^{xvii} Condição 3: inserção no tanque, agitação forte, volume de 70 litros, concentração de 0,75 g/L.

^{xviii} Condição 4: inserção no cesto, agitação forte, volume de 70 litros, concentração de 0,75 g/L.

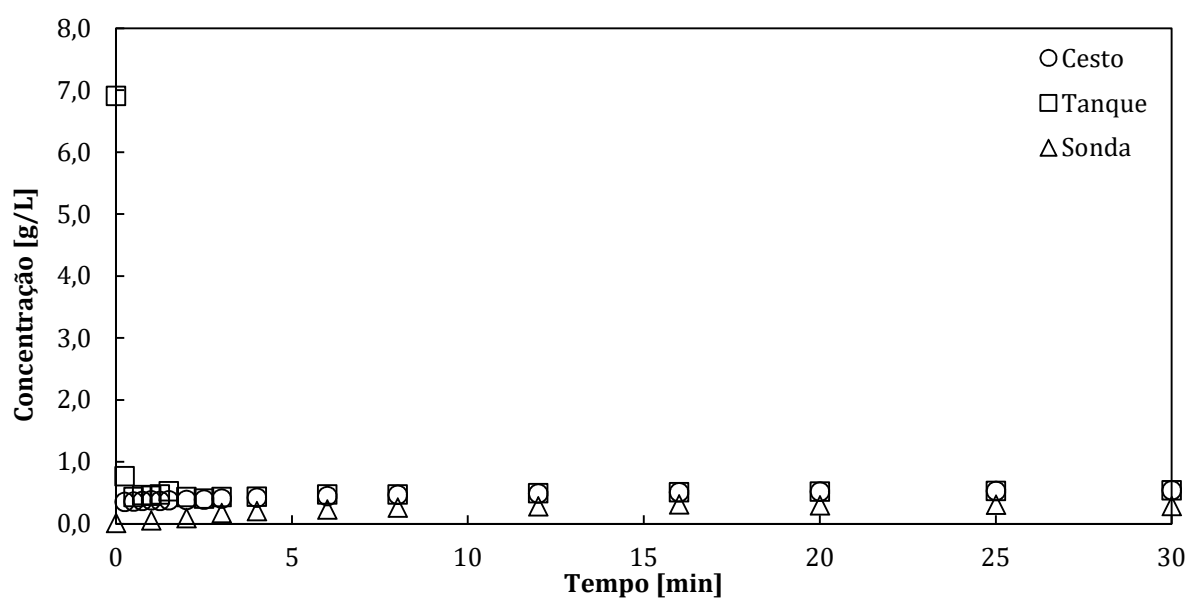


Figura 89 – Dados do experimento fatorial: ensaio 5^{xix}.

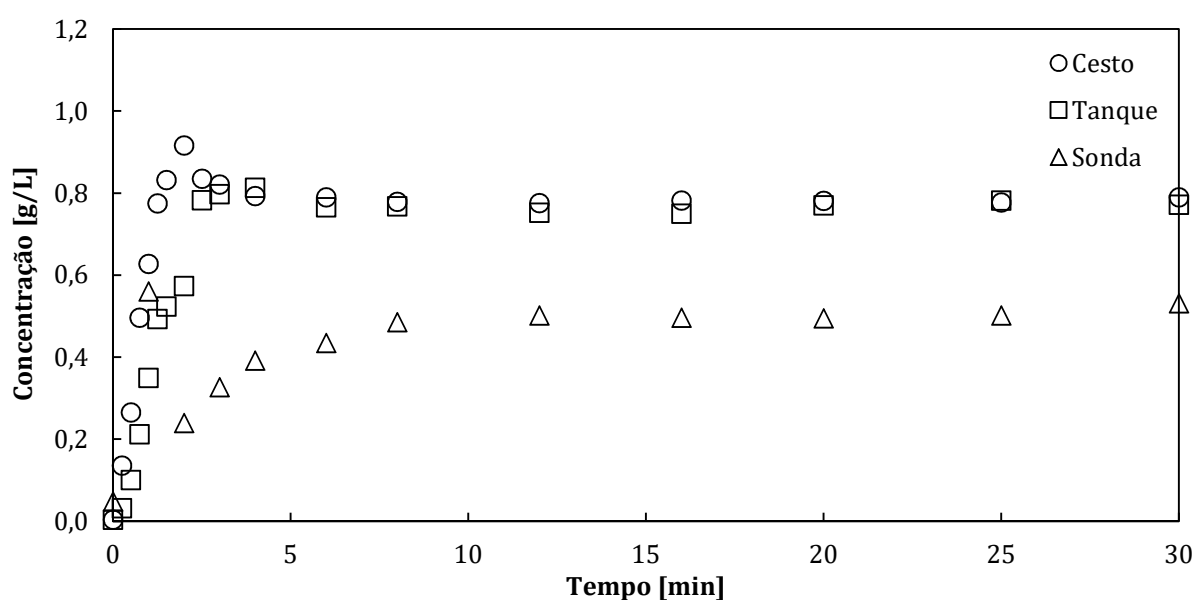


Figura 90 – Dados do experimento fatorial: ensaio 6^{xx}.

^{xix} Condição 5: inserção no tanque, agitação suave, volume de 90 litros, concentração de 0,75 g/L.

^{xx} Condição 6: inserção no cesto, agitação suave, volume de 90 litros, concentração de 0,75 g/L.

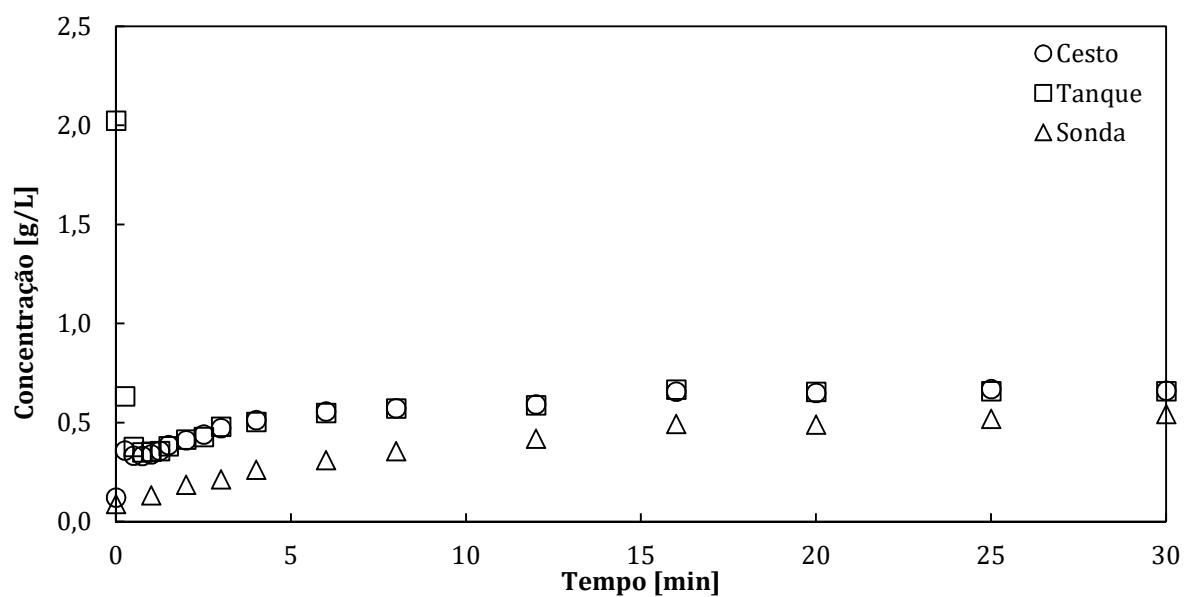


Figura 91 – Dados do experimento fatorial: ensaio 7^{xxi}.

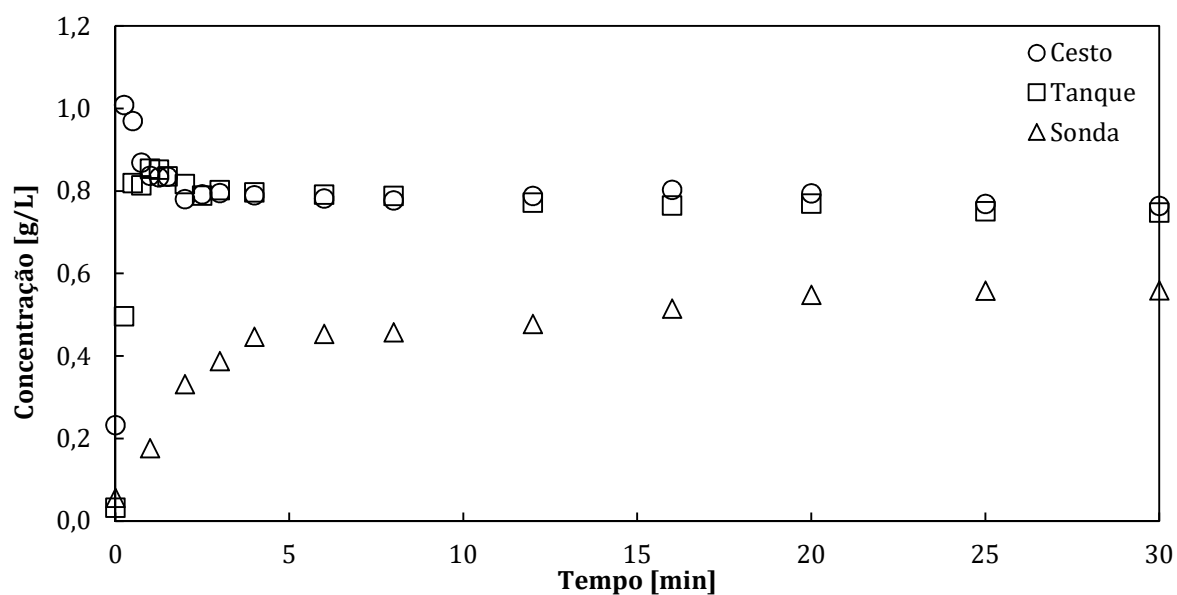


Figura 92 – Dados do experimento fatorial: ensaio 8^{xxii}.

^{xxi} Condição 7: inserção no tanque, agitação forte, volume de 90 litros, concentração de 0,75 g/L.

^{xxii} Condição 8: inserção no cesto, agitação forte, volume de 90 litros, concentração de 0,75 g/L.

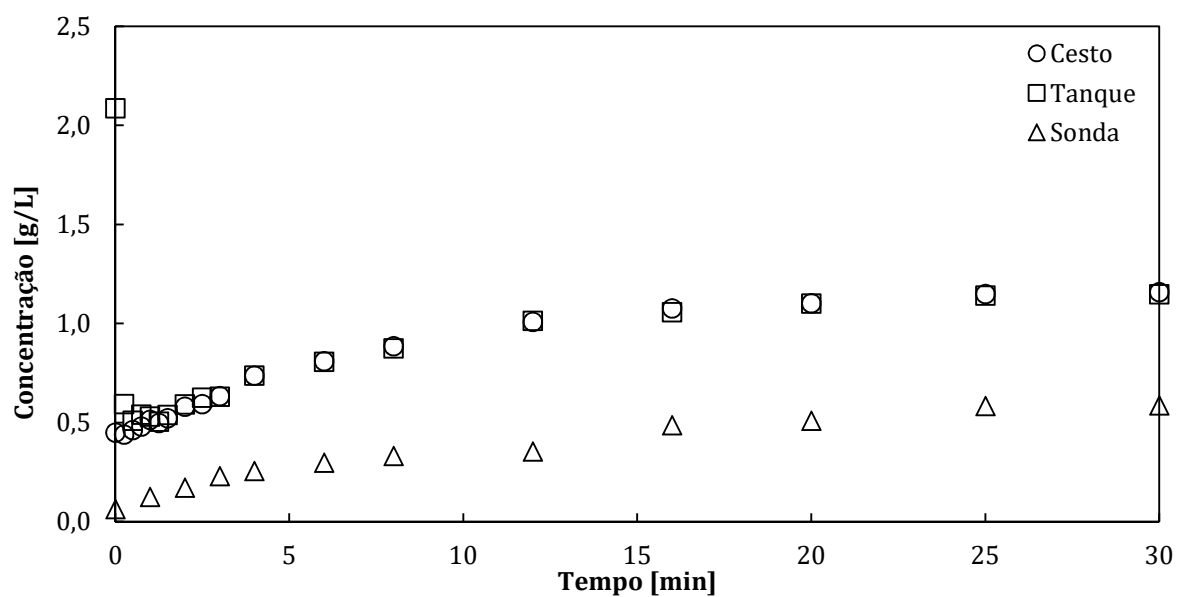


Figura 93 – Dados do experimento fatorial: ensaio 9^{xxiii}.

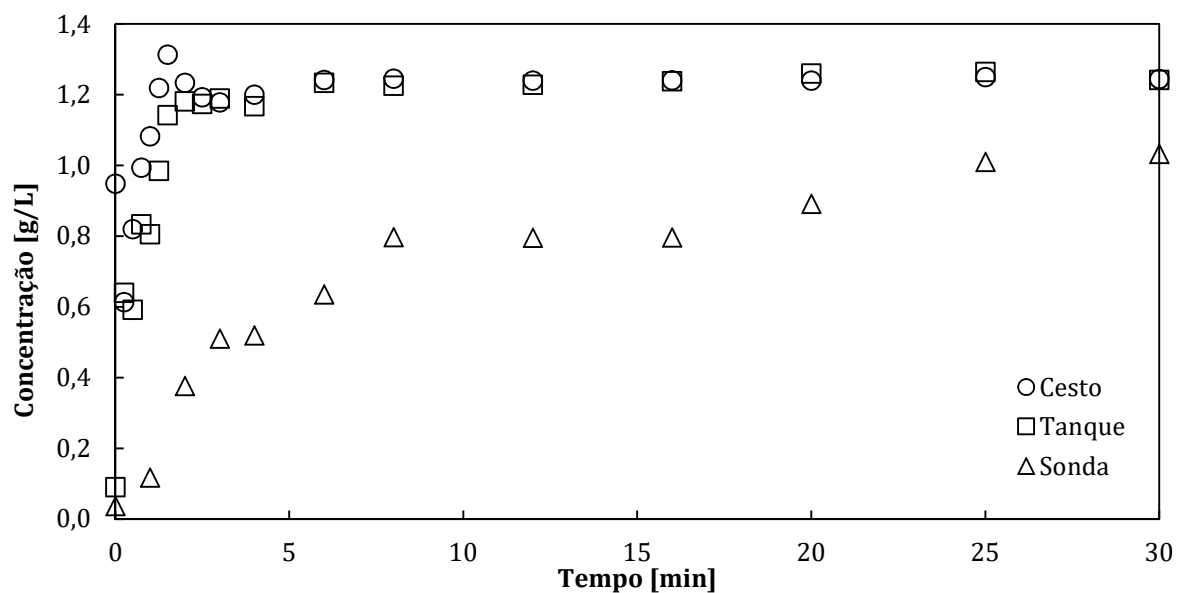


Figura 94 – Dados do experimento fatorial: ensaio 10^{xxiv}.

^{xxiii} Condição 9: inserção no tanque, agitação suave, volume de 70 litros, concentração de 1,25 g/L.

^{xxiv} Condição 10: inserção no cesto, agitação suave, volume de 70 litros, concentração de 1,25 g/L.

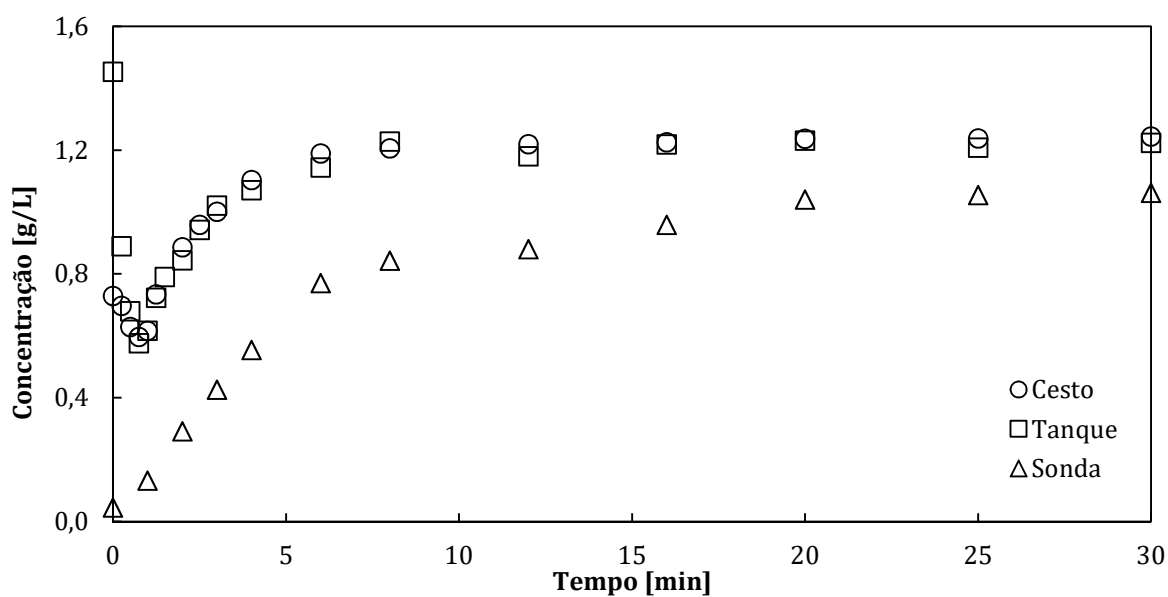


Figura 95 – Dados do experimento fatorial: ensaio 11^{xxv}.

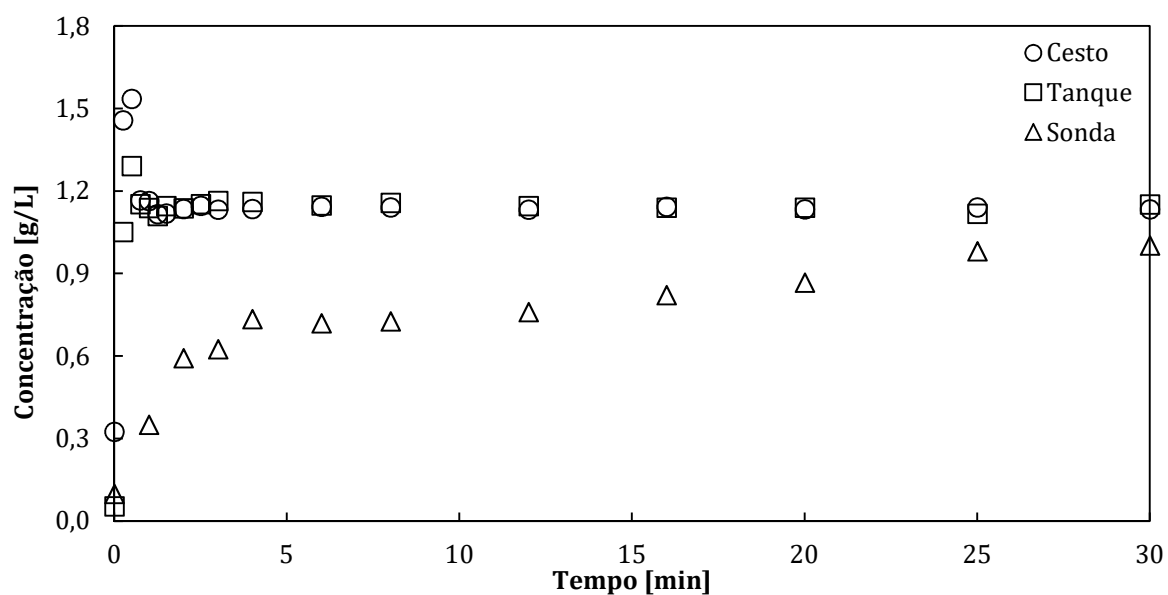


Figura 96 – Dados do experimento fatorial: ensaio 12^{xxvi}.

^{xxv} Condição 11: inserção no tanque, agitação forte, volume de 70 litros, concentração de 1,25 g/L.

^{xxvi} Condição 12: inserção no cesto, agitação forte, volume de 70 litros, concentração de 1,25 g/L.

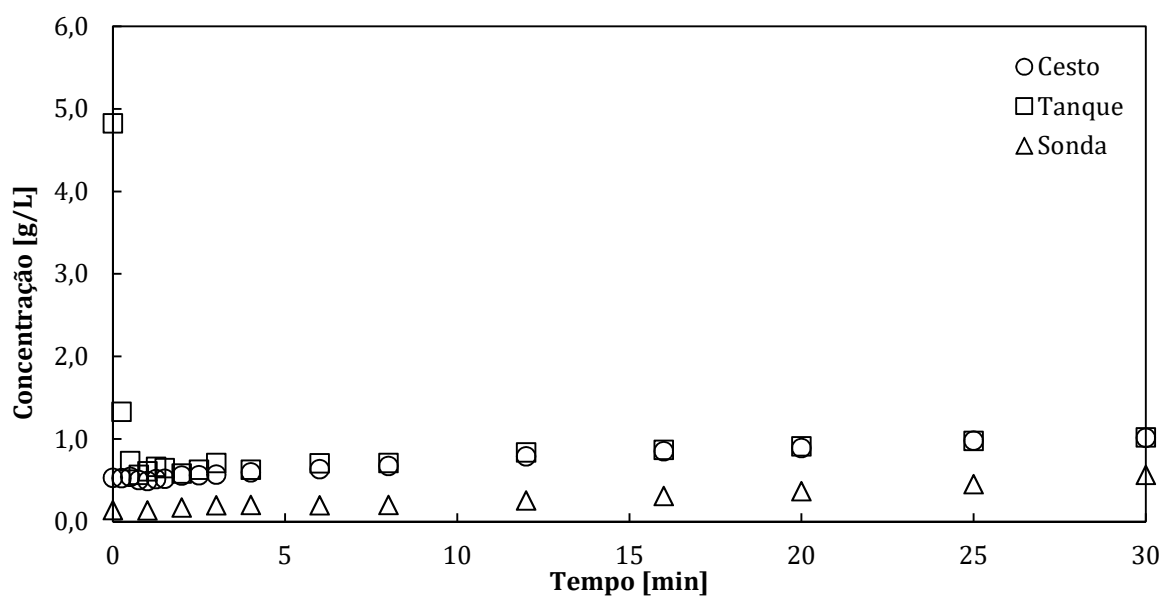


Figura 97 – Dados do experimento fatorial: ensaio 13^{xxvii}.

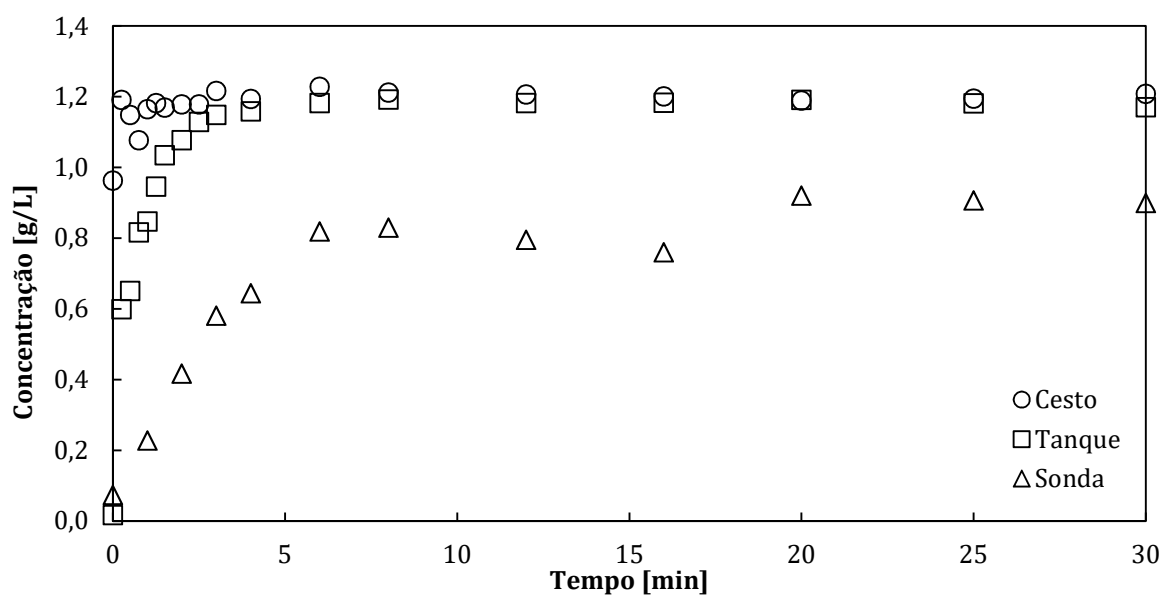


Figura 98 – Dados do experimento fatorial: ensaio 14^{xxviii}.

^{xxvii} Condição 13: inserção no tanque, agitação suave, volume de 90 litros, concentração de 1,25 g/L.

^{xxviii} Condição 14: inserção no cesto, agitação suave, volume de 90 litros, concentração de 1,25 g/L.

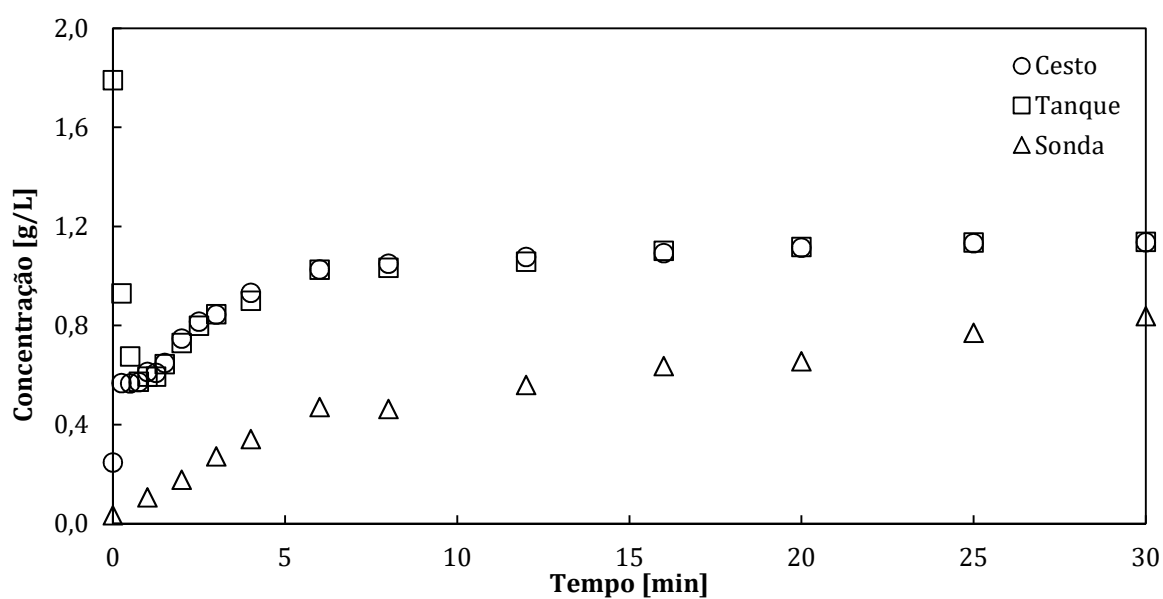


Figura 99 – Dados do experimento fatorial: ensaio 15^{xxix}.

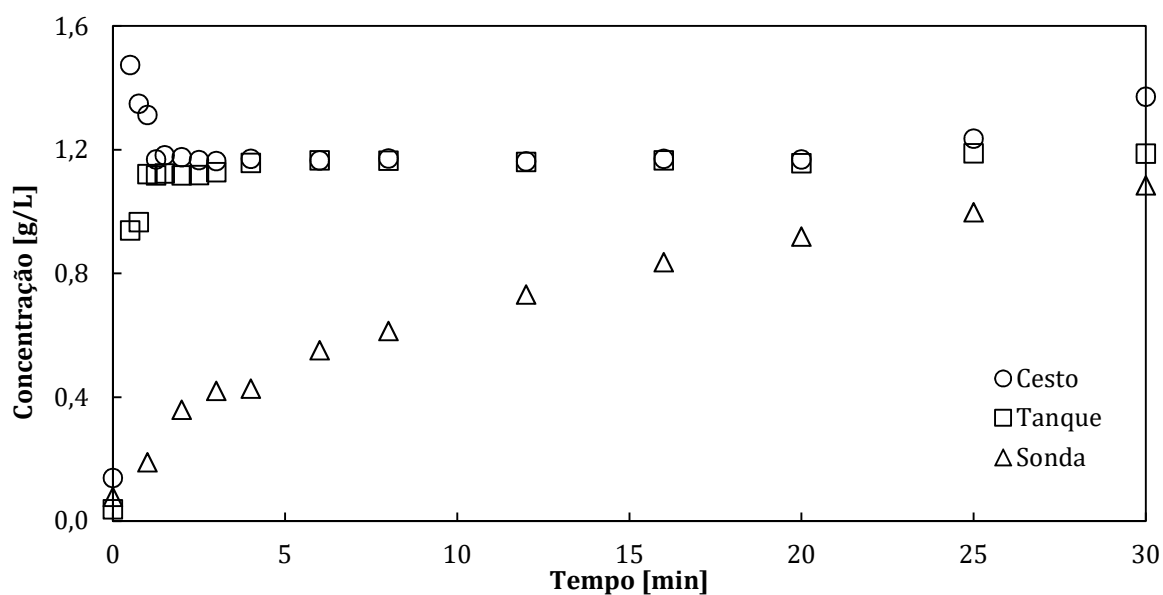


Figura 100 – Dados do experimento fatorial: ensaio 16^{xxx}.

^{xxix} Condição 15: inserção no tanque, agitação forte, volume de 90 litros, concentração de 1,25 g/L.

^{xxx} Condição 16: inserção no cesto, agitação forte, volume de 90 litros, concentração de 1,25 g/L.

APÊNDICE VI – RESULTADOS DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO EXPERIMENTO FATORIAL

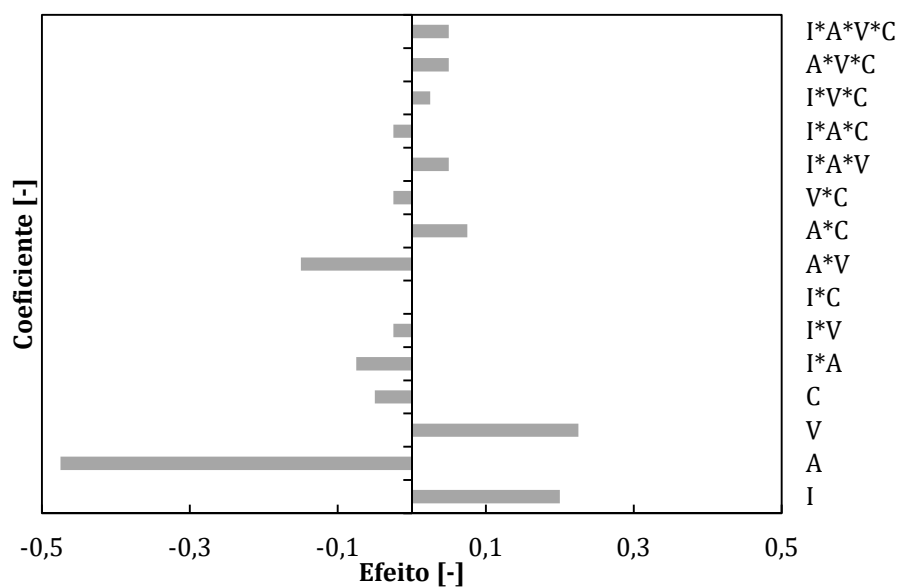


Figura 101 – Análise de sensibilidade do tempo de equilíbrio entre tanque e cesto do experimento fatorial.

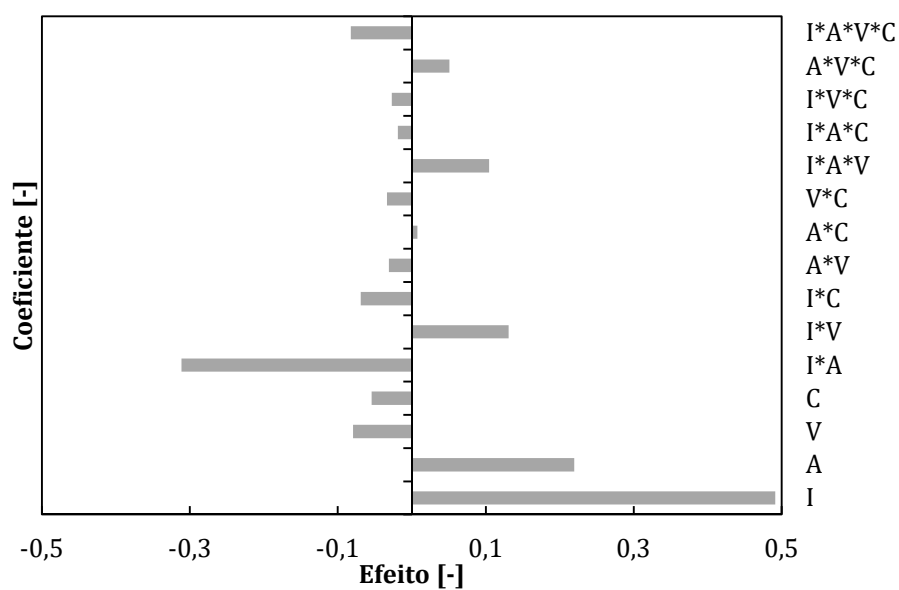


Figura 102 – Análise de sensibilidade da relação entre a concentração inserida e concentração média do tanque e cesto em 6 minutos.

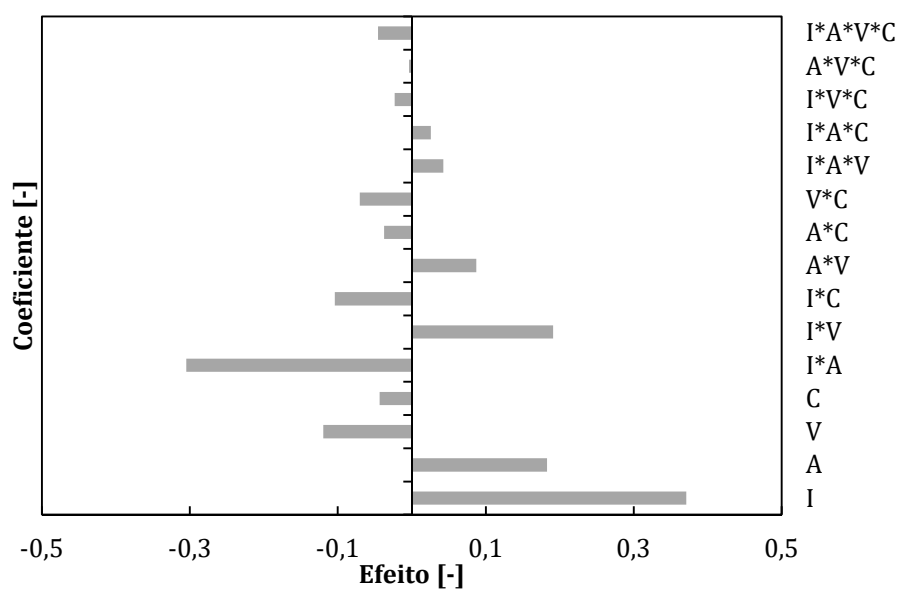


Figura 103 – Análise de sensibilidade da relação entre a concentração inserida e concentração média do tanque e cesto em 16 minutos.

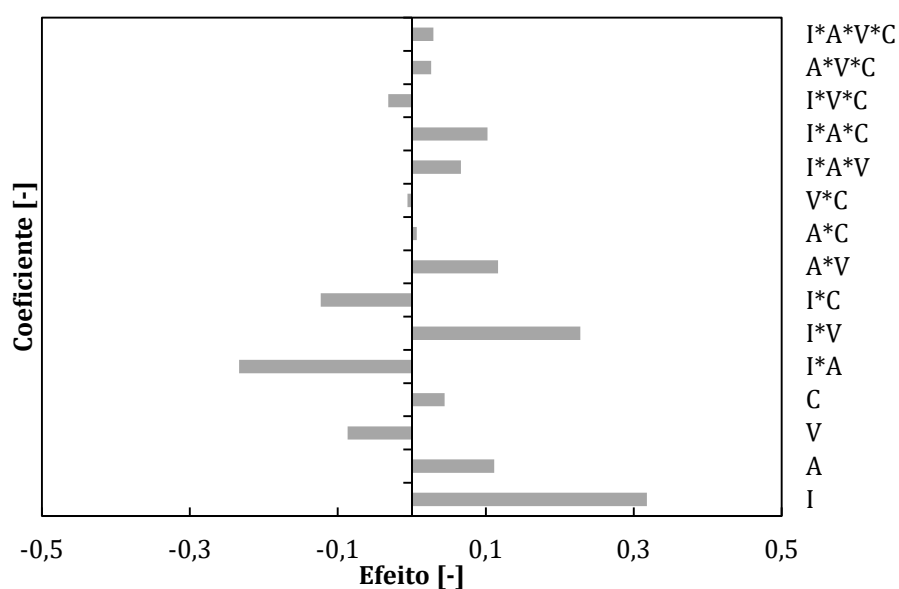


Figura 104 – Análise de sensibilidade da relação entre a concentração inserida e concentração média do tanque e cesto em 30 minutos.

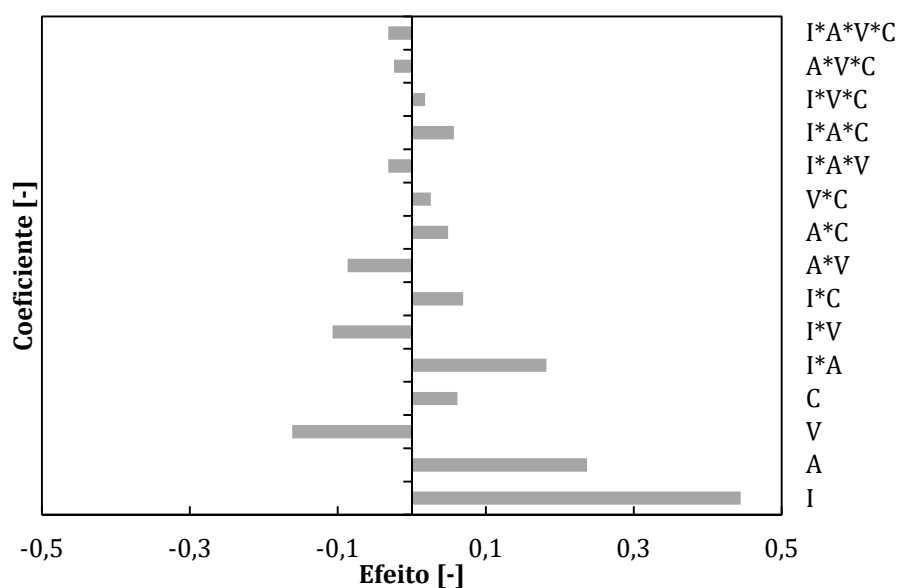


Figura 105 – Análise de sensibilidade do inverso do tempo no qual o tanque e cesto atingem a concentração inserida.

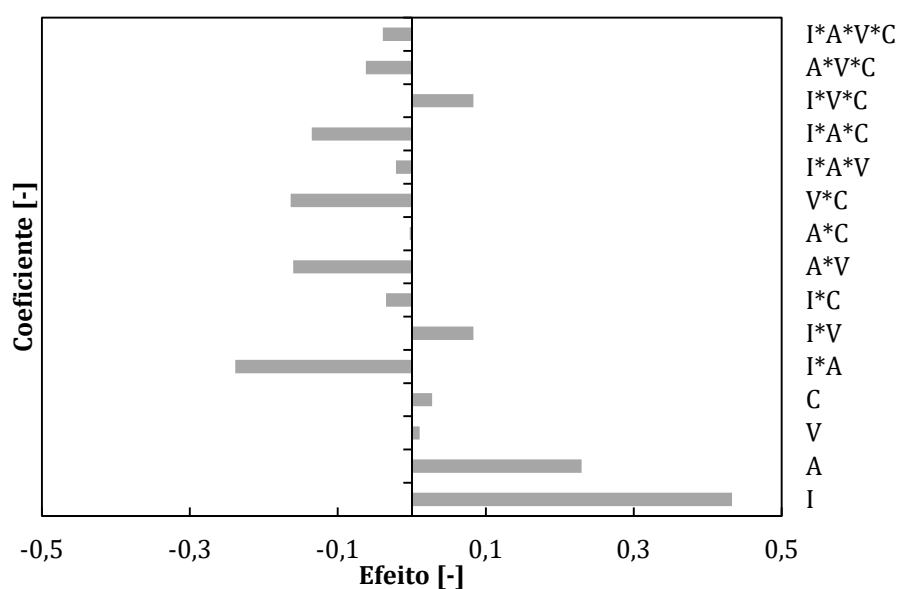


Figura 106 – Análise de sensibilidade do percentual da concentração inserida presente na sonda em 6 minutos.

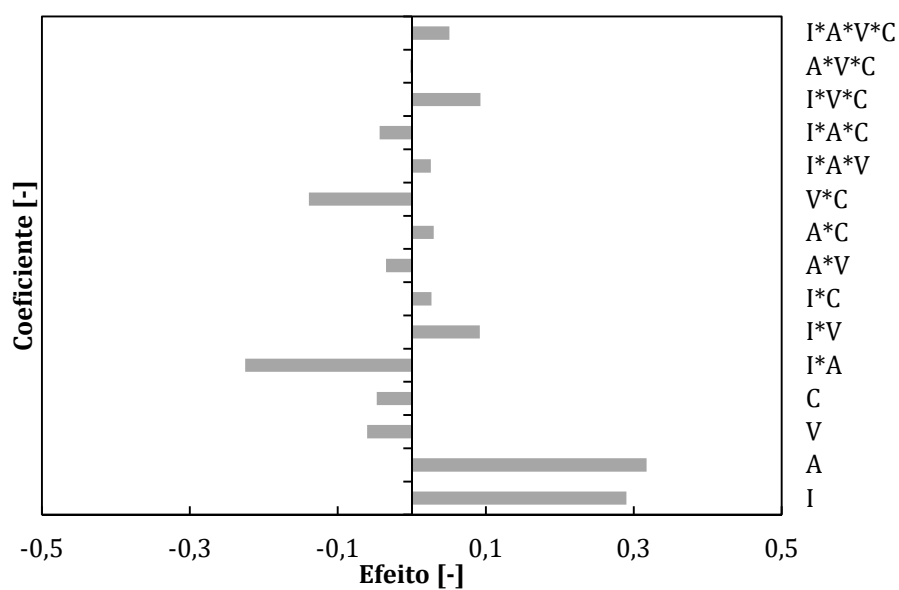


Figura 107 – Análise de sensibilidade do percentual da concentração inserida presente na sonda em 16 minutos.

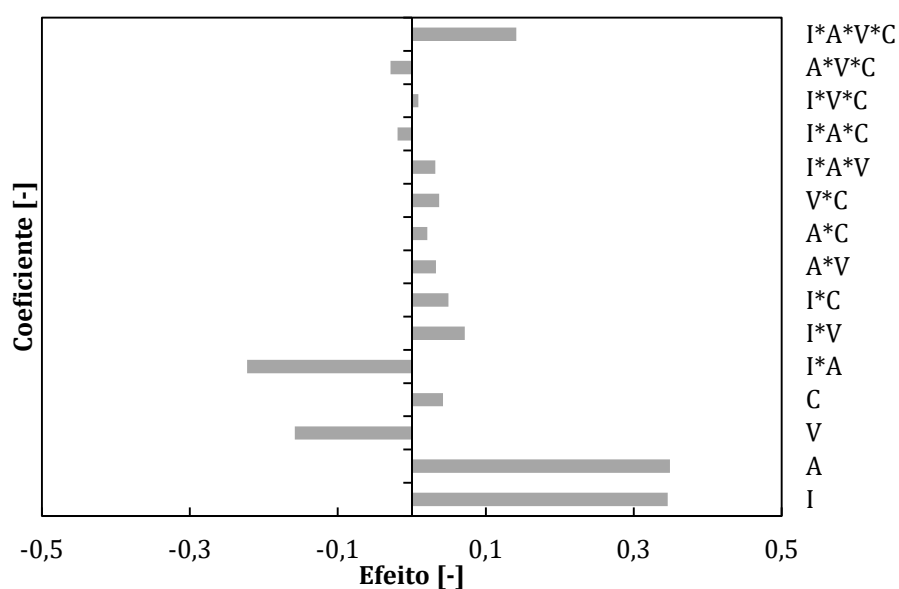


Figura 108 – Análise de sensibilidade do percentual da concentração inserida presente na sonda em 30 minutos.

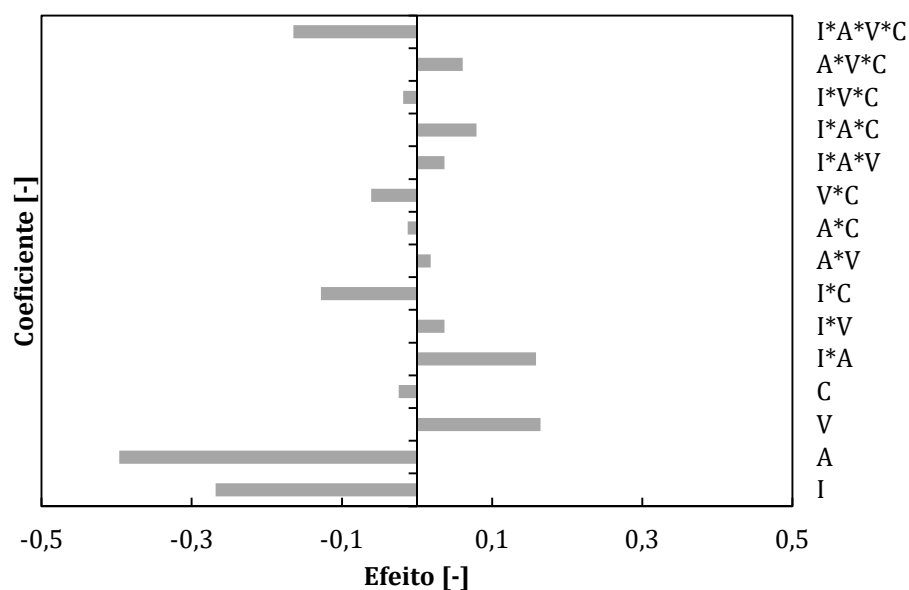


Figura 109 – Análise de sensibilidade da diferença relativa entre a concentração da sonda e a concentração média do tanque e cesto em 30 minutos do experimento.

A seguir são mostrados os quadros resultantes da análise da variância do experimento fatorial. Os valores em negrito são considerados significativos baseados na distribuição F de Snedecor (Apêndice VII) e quanto maior a sua magnitude, maior a influência.

FATOR	F
Inserção	10,06
Agitação	56,73
Volume	12,73
Concentração	0,6286

Figura 110 – ANOVA do tempo de equilíbrio entre tanque e cesto do experimento fatorial.

FATOR	F
Inserção	18,64
Agitação	3,7166
Volume	0,4873
Concentração	0,2263

Figura 111 – ANOVA da relação entre a concentração inserida e concentração média do tanque e cesto em 6 minutos.

FATOR	F
Inserção	9,517
Agitação	2,3045
Volume	0,99
Concentração	0,1318

Figura 112 – ANOVA da relação entre a concentração inserida e concentração média do tanque e cesto em 16 minutos.

FATOR	F
Inserção	7,28
Agitação	0,8915
Volume	0,5423
Concentração	0,1405

Figura 113 – ANOVA da relação entre a concentração inserida e concentração média do tanque e cesto em 30 minutos.

FATOR	F
Inserção	32,81
Agitação	9,304
Volume	4,3426
Concentração	0,6325

Figura 114 – ANOVA do inverso do tempo no qual o tanque e cesto atingem a concentração inserida.

FATOR	F
Inserção	13,85
Agitação	3,8917
Volume	0,0085
Concentração	0,055

Figura 115 – ANOVA do percentual da concentração inserida presente na sonda em 6 minutos.

FATOR	F
Inserção	9,763
Agitação	11,68
Volume	0,4233
Concentração	0,2612

Figura 116 – ANOVA do percentual da concentração inserida presente na sonda em 16 minutos.

FATOR	F
Inserção	15,995
Agitação	16,274
Volume	3,354
Concentração	0,237

Figura 117 – ANOVA do percentual da concentração inserida presente na sonda em 30 minutos.

FATOR	F
Inserção	9,223
Agitação	20,13
Volume	3,4729
Concentração	0,0762

Figura 118 – ANOVA da diferença relativa entre a concentração da sonda e a concentração média do tanque e cesto em 30 minutos do experimento.

APÊNDICE VII – DISTRIBUIÇÃO F DE SNEDECOR

Para verificar se um fator é significativo, utilizou-se a análise da variância a qual se baseia na distribuição F de Snedecor mostrada na Figura 119. Se os valores obtidos forem maior que o valor F para determinado grau de liberdade no numerador e denominador, o parâmetro analisado é considerado significativo.

Nível de significância de 5%

U ₁	GRAUS DE LIBERDADE DO NUMERADOR										
	1	2	3	4	5	6	7	8	12	24	∞
U ₂											
1	161,45	199,50	215,71	224,58	230,16	233,99	236,77	238,88	243,91	249,05	254,31
2	18,51	19,00	19,16	19,25	19,30	19,33	19,35	19,37	19,41	19,45	19,50
3	10,13	9,55	9,28	9,12	9,01	8,94	8,89	8,85	8,74	8,64	8,53
4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,09	6,04	5,91	5,77	5,63
5	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,88	4,82	4,68	4,53	4,37
6	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,21	4,15	4,00	3,84	3,67
7	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87	3,79	3,73	3,57	3,41	3,23
8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,50	3,44	3,28	3,12	2,93
9	5,12	4,26	3,86	3,63	3,48	3,37	3,29	3,23	3,07	2,90	2,71
10	4,96	4,10	3,71	3,48	3,33	3,22	3,14	3,07	2,91	2,74	2,54
11	4,84	3,98	3,59	3,36	3,20	3,09	3,01	2,95	2,79	2,61	2,40
12	4,75	3,89	3,49	3,26	3,11	3,00	2,91	2,85	2,69	2,51	2,30
13	4,67	3,81	3,41	3,18	3,03	2,92	2,83	2,77	2,60	2,42	2,21
14	4,60	3,74	3,34	3,11	2,96	2,85	2,76	2,70	2,53	2,35	2,13
15	4,54	3,68	3,29	3,06	2,90	2,79	2,71	2,64	2,48	2,29	2,07
16	4,49	3,63	3,24	3,01	2,85	2,74	2,66	2,59	2,42	2,24	2,01
17	4,45	3,59	3,20	2,96	2,81	2,70	2,61	2,55	2,38	2,19	1,96
18	4,41	3,55	3,16	2,93	2,77	2,66	2,58	2,51	2,34	2,15	1,92
19	4,38	3,52	3,13	2,90	2,74	2,63	2,54	2,48	2,31	2,11	1,88
20	4,35	3,49	3,10	2,87	2,71	2,60	2,51	2,45	2,28	2,08	1,84
21	4,32	3,47	3,07	2,84	2,68	2,57	2,49	2,42	2,25	2,05	1,81
22	4,30	3,44	3,05	2,82	2,66	2,55	2,46	2,40	2,23	2,03	1,78
23	4,28	3,42	3,03	2,80	2,64	2,53	2,44	2,37	2,20	2,01	1,76
24	4,26	3,40	3,01	2,78	2,62	2,51	2,42	2,36	2,18	1,98	1,73
25	4,24	3,39	2,99	2,76	2,60	2,49	2,40	2,34	2,16	1,96	1,71
26	4,23	3,37	2,98	2,74	2,59	2,47	2,39	2,32	2,15	1,95	1,69
27	4,21	3,35	2,96	2,73	2,57	2,46	2,37	2,31	2,13	1,93	1,67
28	4,20	3,34	2,95	2,71	2,56	2,45	2,36	2,29	2,12	1,91	1,65
29	4,18	3,33	2,93	2,70	2,55	2,43	2,35	2,28	2,10	1,90	1,64
30	4,17	3,32	2,92	2,69	2,53	2,42	2,33	2,27	2,09	1,89	1,62
40	4,08	3,23	2,84	2,61	2,45	2,34	2,25	2,18	2,00	1,79	1,51
60	4,00	3,15	2,76	2,53	2,37	2,25	2,17	2,10	1,92	1,70	1,39
120	3,92	3,07	2,68	2,45	2,29	2,18	2,09	2,02	1,83	1,61	1,25
∞	3,84	3,00	2,61	2,37	2,21	2,10	2,01	1,94	1,75	1,52	1,01

Figura 119 – Distribuição F de Snedecor (Fonte: Lira, 2013)

APÊNDICE VIII – COMPARATIVOS ENTRE DADOS EXPERIMENTAIS E MODELO NUMÉRICO

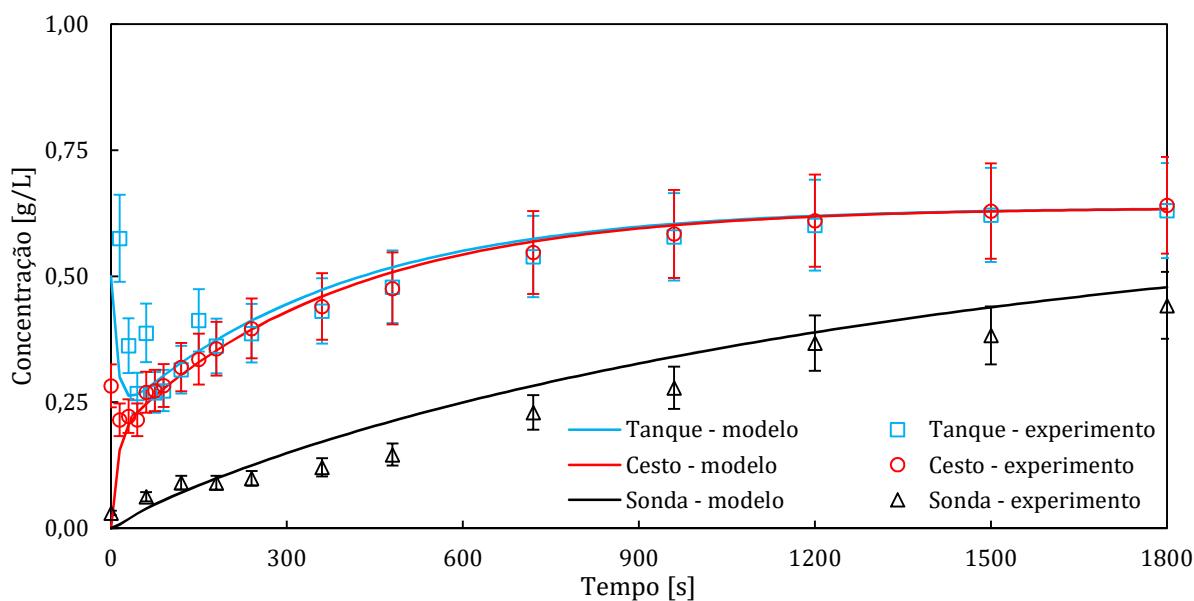


Figura 120 – Comparativo entre dados experimentais e numéricos: ensaio 1^{xxxI} do experimento fatorial.

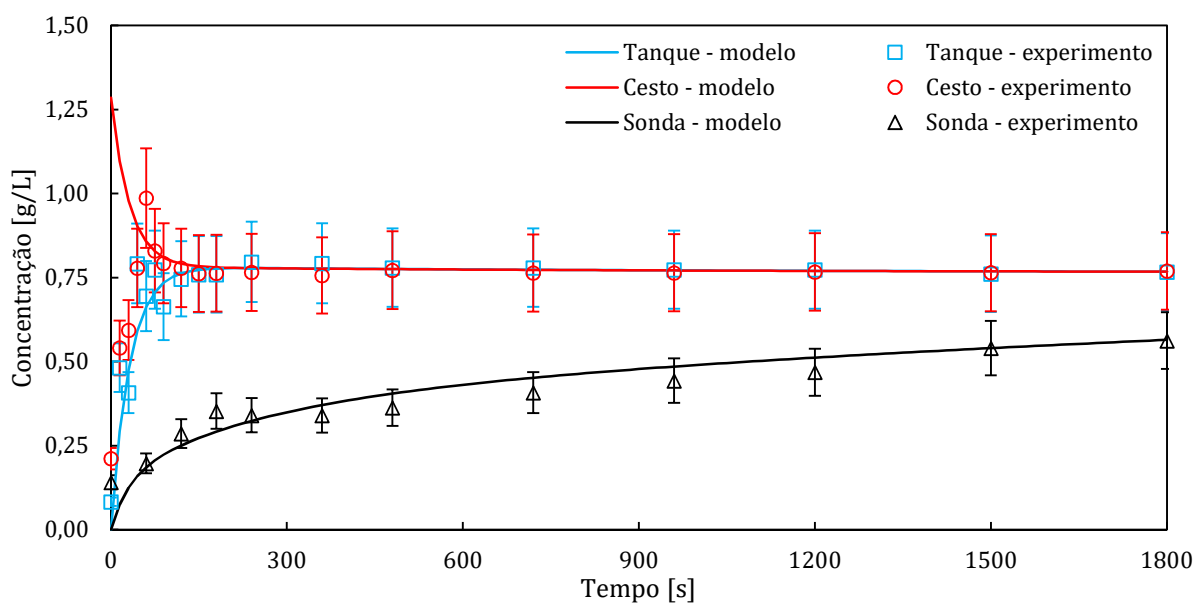


Figura 121 – Comparativo entre dados experimentais e numéricos: ensaio 2^{xxxII} do experimento fatorial.

^{xxxI} Condição 1: inserção no tanque, agitação suave, volume de 70 litros, concentração de 0,75 g/L.

^{xxxII} Condição 2: inserção no cesto, agitação suave, volume de 70 litros, concentração de 0,75 g/L.

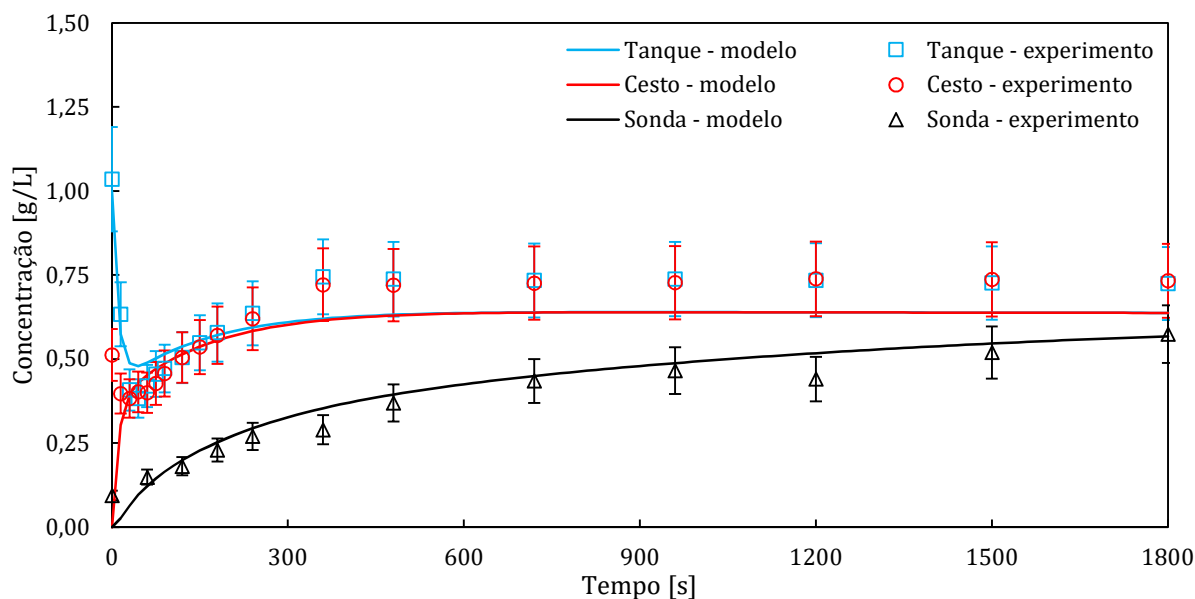


Figura 122 – Comparativo entre dados experimentais e numéricos: ensaio 3^{xxxiii} do experimento fatorial.

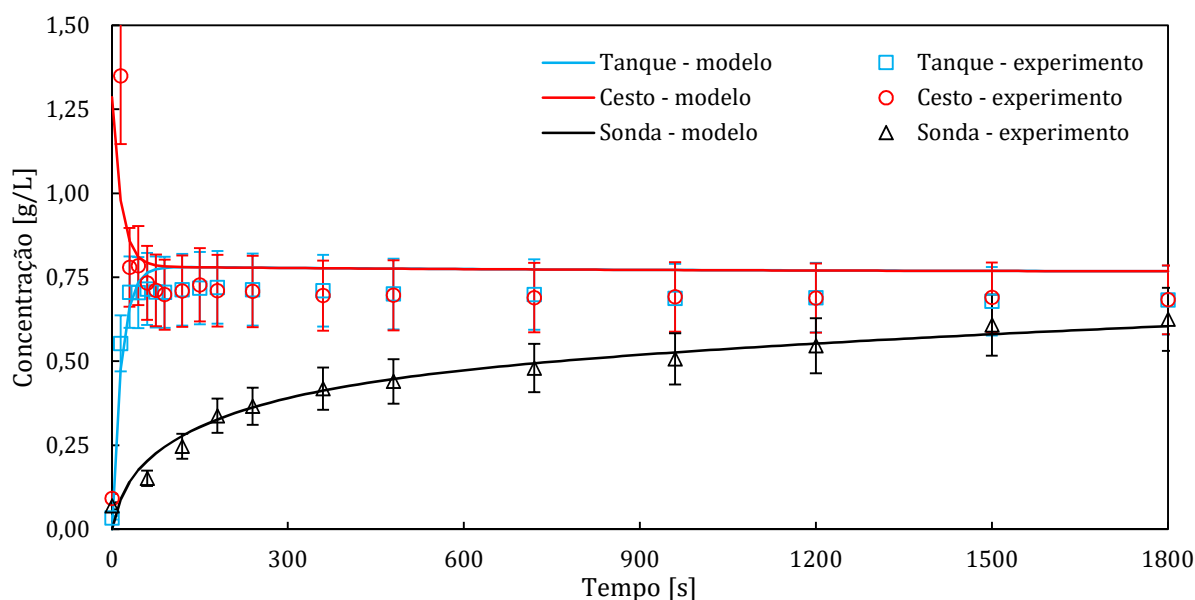


Figura 123 – Comparativo entre dados experimentais e numéricos: ensaio 4^{xxxiv} do experimento fatorial.

^{xxxiii} Condição 3: inserção no tanque, agitação forte, volume de 70 litros, concentração de 0,75 g/L.

^{xxxiv} Condição 4: inserção no cesto, agitação forte, volume de 70 litros, concentração de 0,75 g/L.

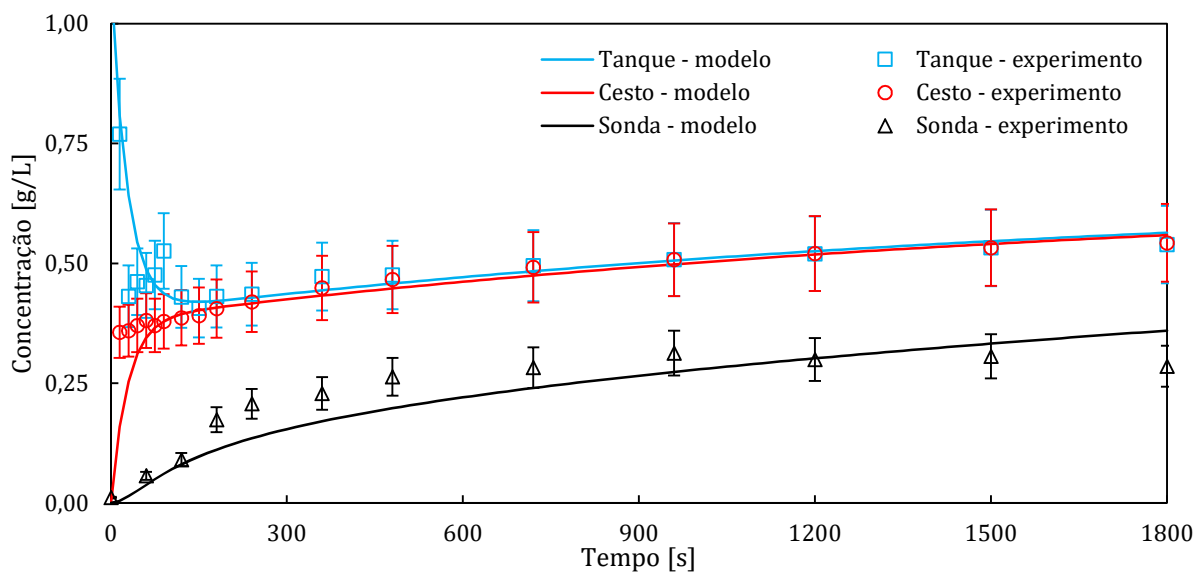


Figura 124 – Comparativo entre dados experimentais e numéricos: ensaio 5^{xxxv} do experimento fatorial.

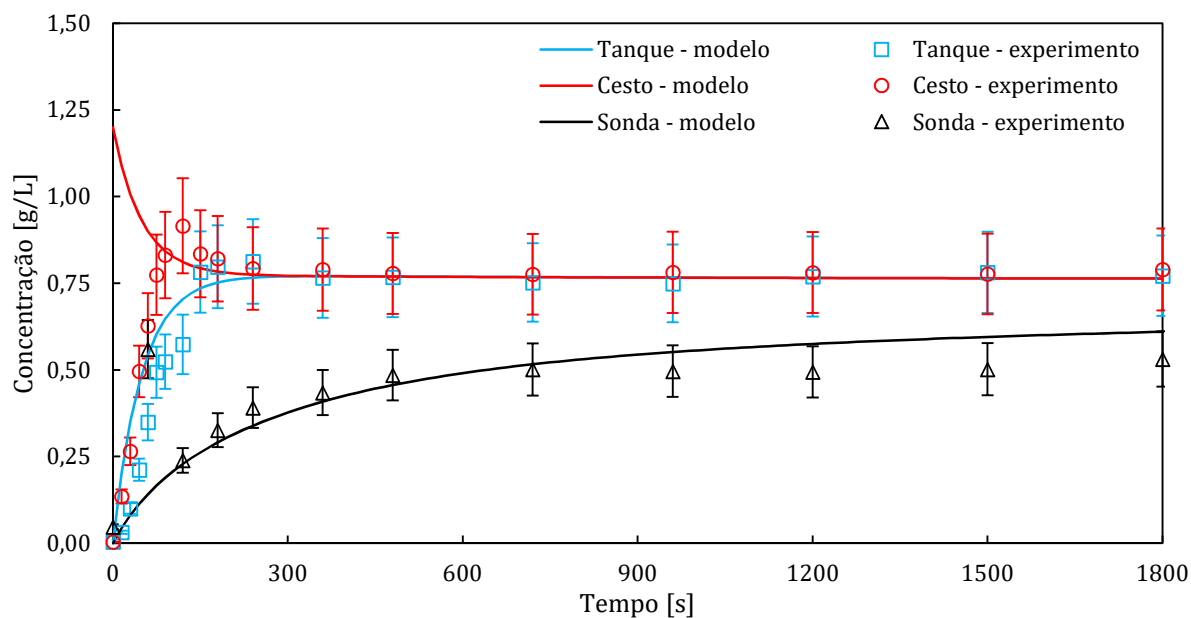


Figura 125 – Comparativo entre dados experimentais e numéricos: ensaio 6^{xxxvi} do experimento fatorial.

^{xxxv} Condição 5: inserção no tanque, agitação suave, volume de 90 litros, concentração de 0,75 g/L.

^{xxxvi} Condição 6: inserção no cesto, agitação suave, volume de 90 litros, concentração de 0,75 g/L.

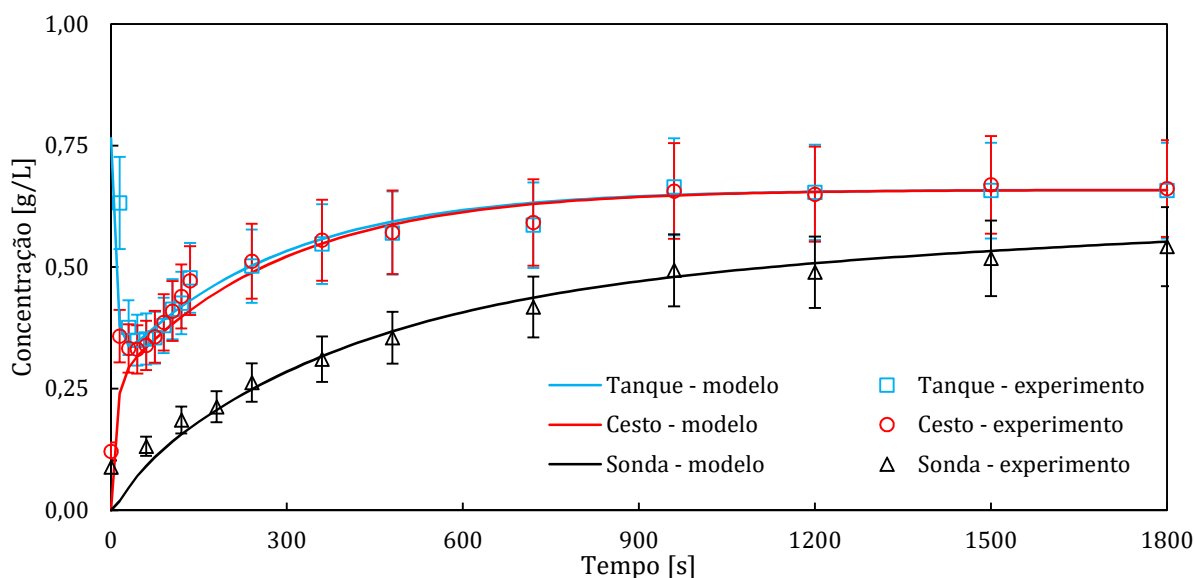


Figura 126 – Comparativo entre dados experimentais e numéricos: ensaio 7^{xxxvii} do experimento fatorial.

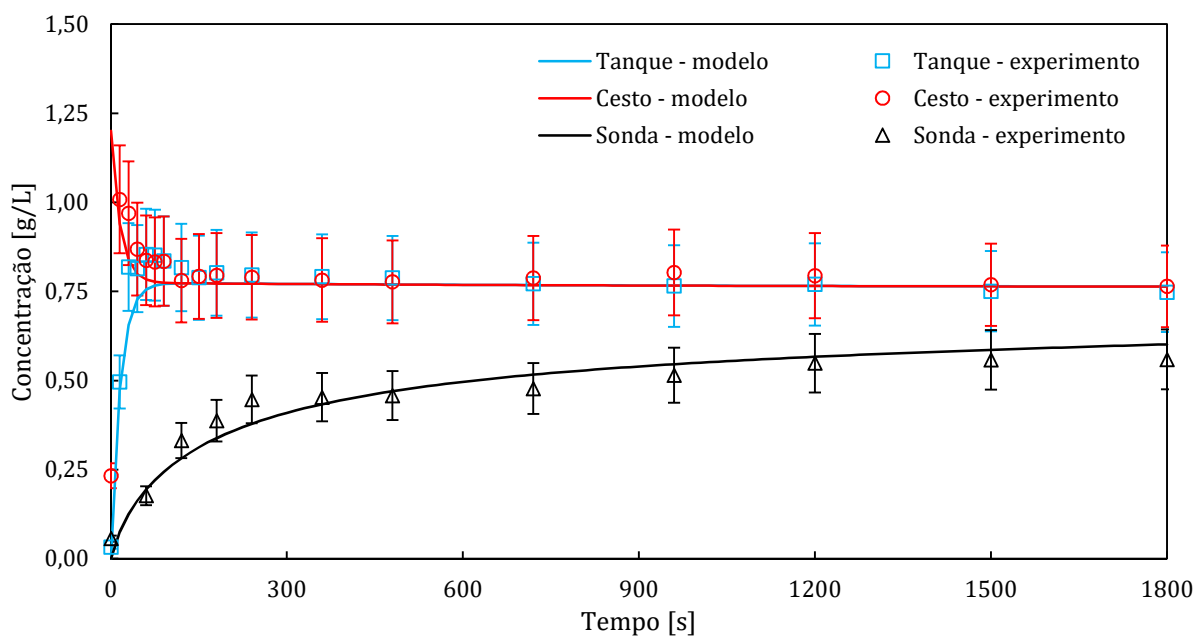


Figura 127 – Comparativo entre dados experimentais e numéricos: ensaio 8^{xxxviii} do experimento fatorial.

^{xxxvii} Condição 7: inserção no tanque, agitação forte, volume de 90 litros, concentração de 0,75 g/L.

^{xxxviii} Condição 8: inserção no cesto, agitação forte, volume de 90 litros, concentração de 0,75 g/L.

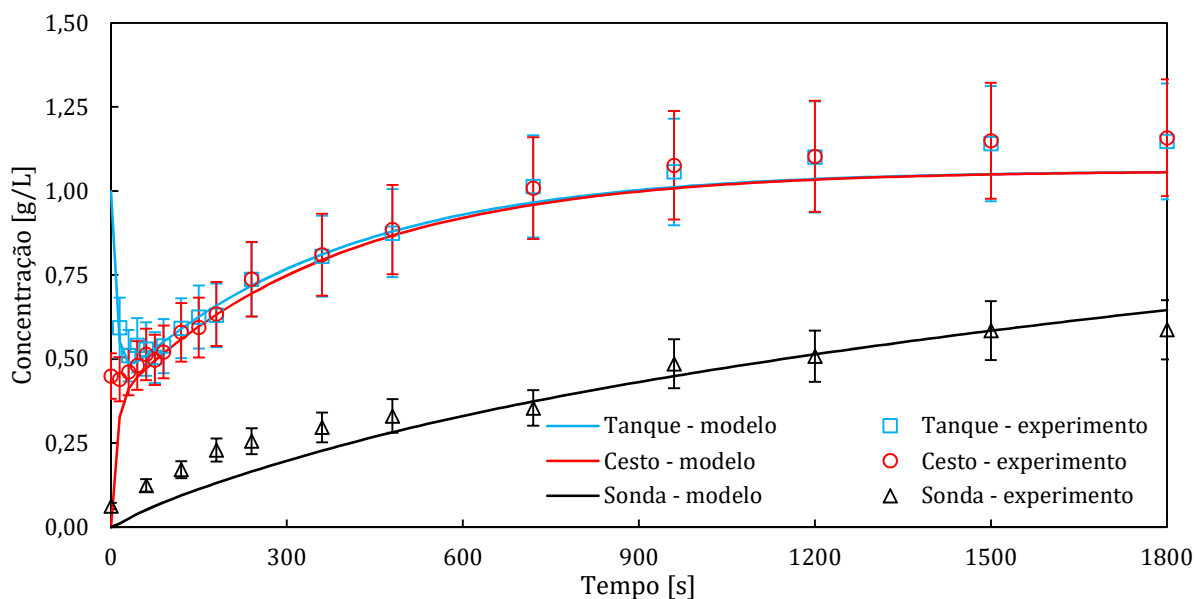


Figura 128 – Comparativo entre dados experimentais e numéricos: ensaio 9^{xxxix} do experimento fatorial.

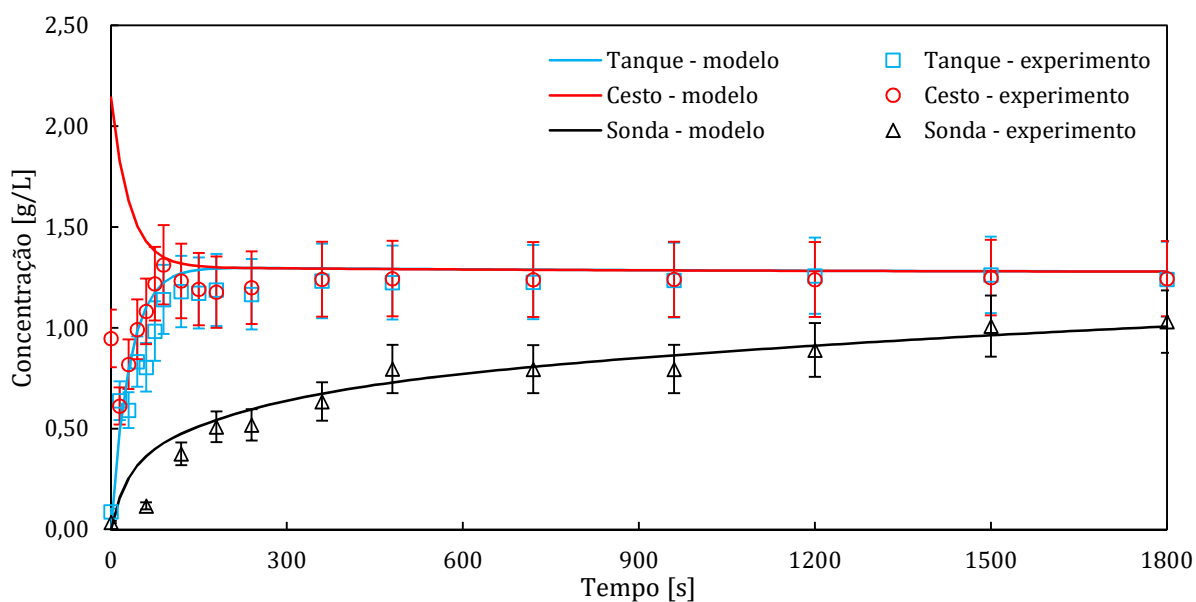


Figura 129 – Comparativo entre dados experimentais e numéricos: ensaio 10^{xl} do experimento fatorial.

^{xxxix} Condição 9: inserção no tanque, agitação suave, volume de 70 litros, concentração de 1,25 g/L.

^{xl} Condição 10: inserção no cesto, agitação suave, volume de 70 litros, concentração de 1,25 g/L.

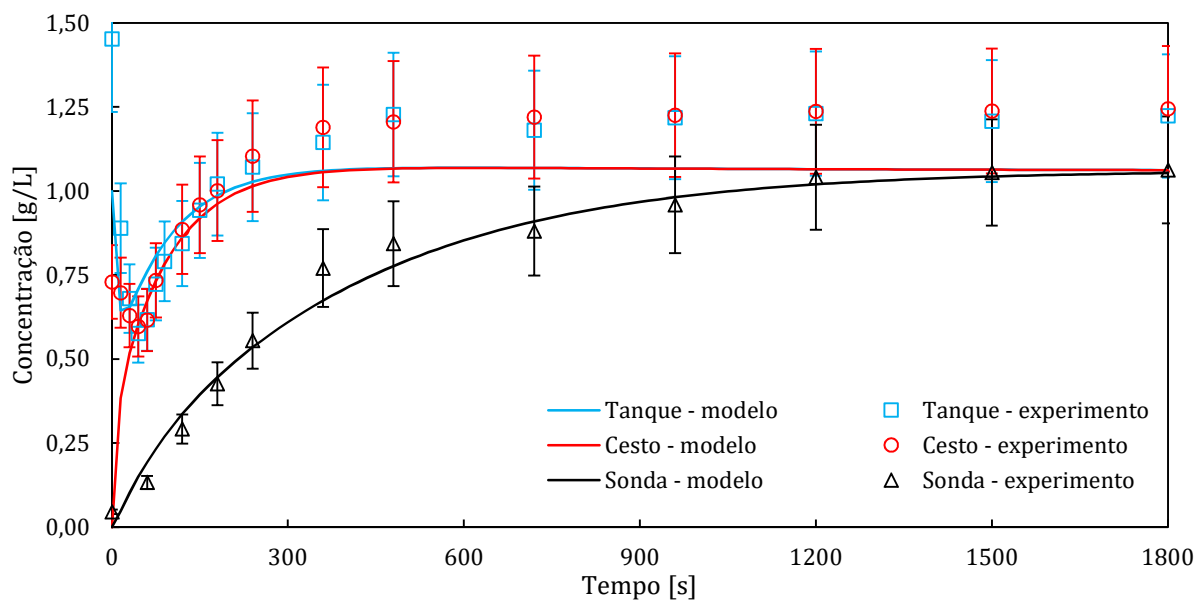


Figura 130 – Comparativo entre dados experimentais e numéricos: ensaio 11^{xli} do experimento fatorial.

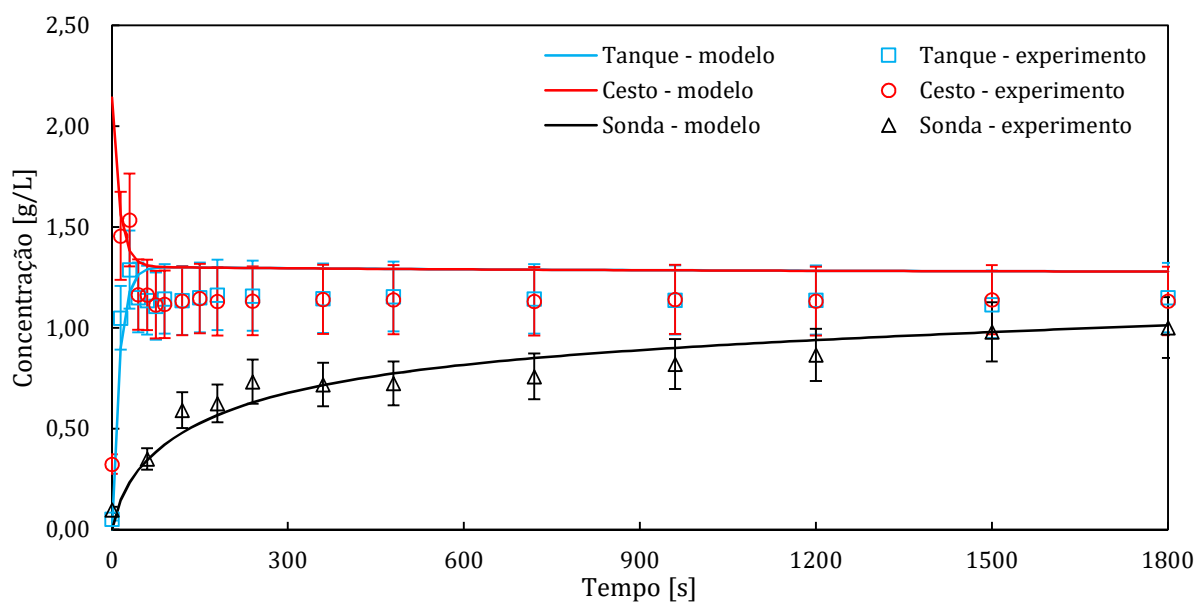


Figura 131 – Comparativo entre dados experimentais e numéricos: ensaio 12^{xlii} do experimento fatorial.

^{xli} Condição 11: inserção no tanque, agitação forte, volume de 70 litros, concentração de 1,25 g/L.

^{xlii} Condição 12: inserção no cesto, agitação forte, volume de 70 litros, concentração de 1,25 g/L.

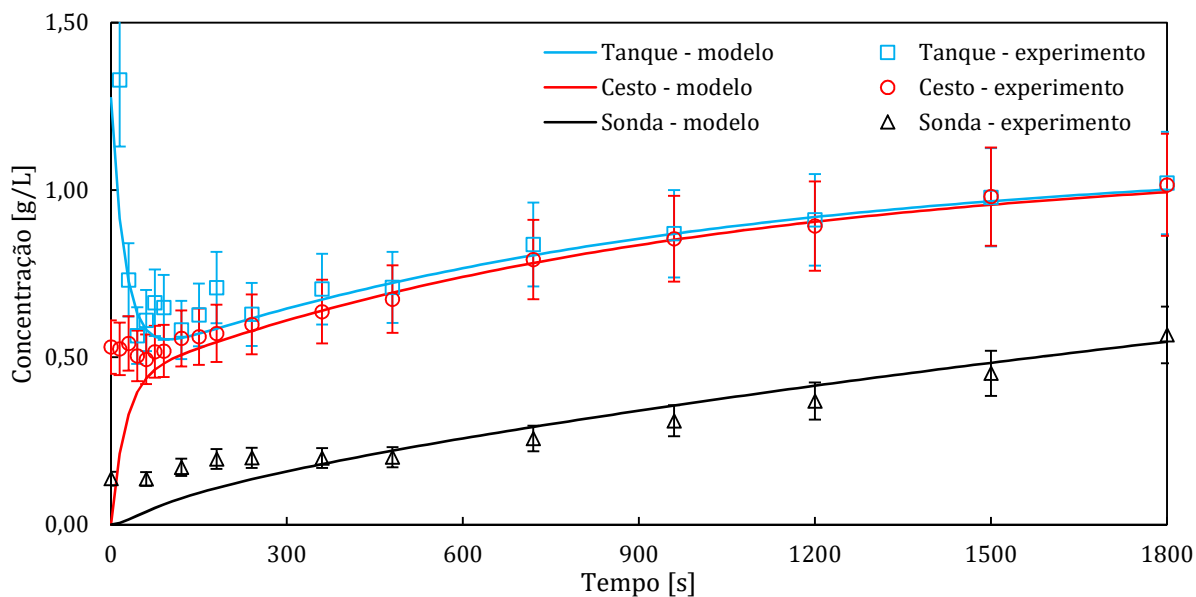


Figura 132 – Comparativo entre dados experimentais e numéricos: ensaio 13^{xliii} do experimento fatorial.

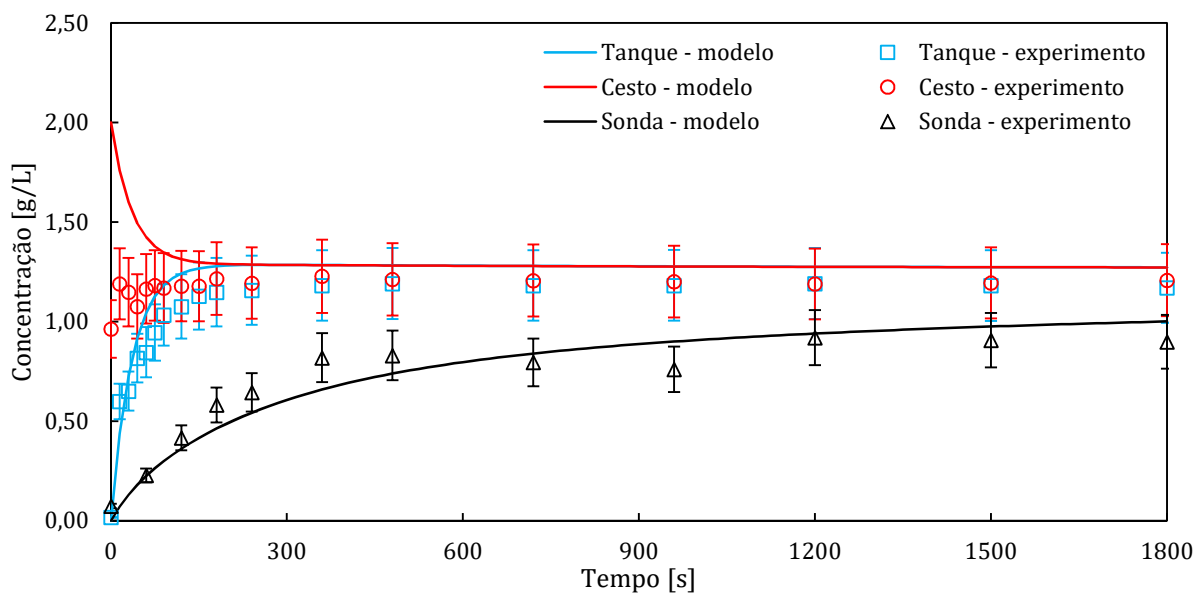


Figura 133 – Comparativo entre dados experimentais e numéricos: ensaio 14^{xliiv} do experimento fatorial.

^{xliii} Condição 13: inserção no tanque, agitação suave, volume de 90 litros, concentração de 1,25 g/L.

^{xliiv} Condição 14: inserção no cesto, agitação suave, volume de 90 litros, concentração de 1,25 g/L.

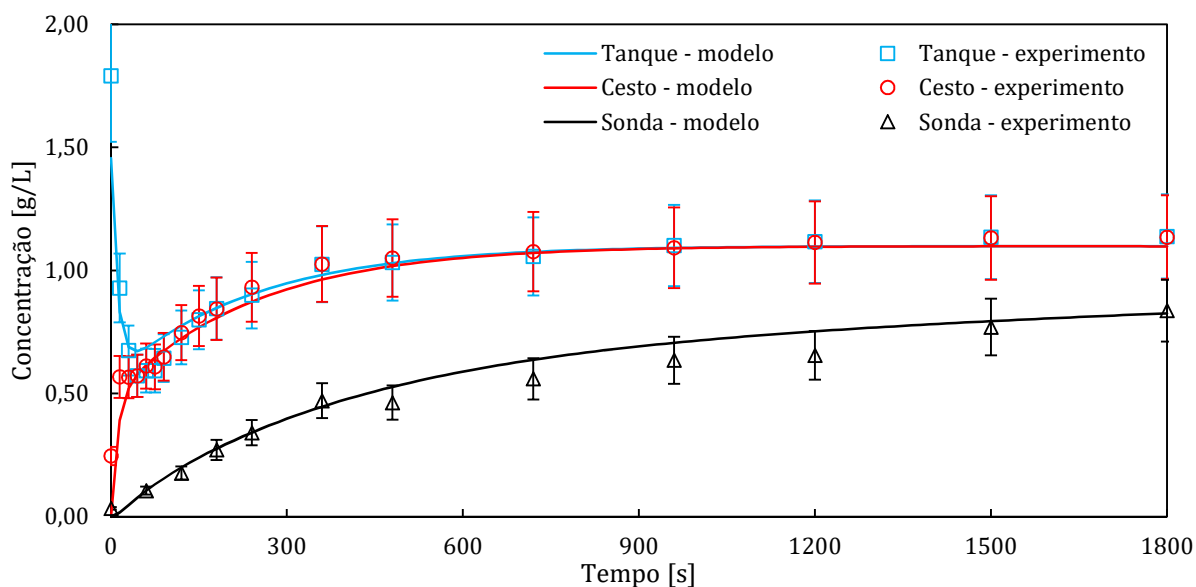


Figura 134 – Comparativo entre dados experimentais e numéricos: ensaio 15^{xlv} do experimento fatorial.

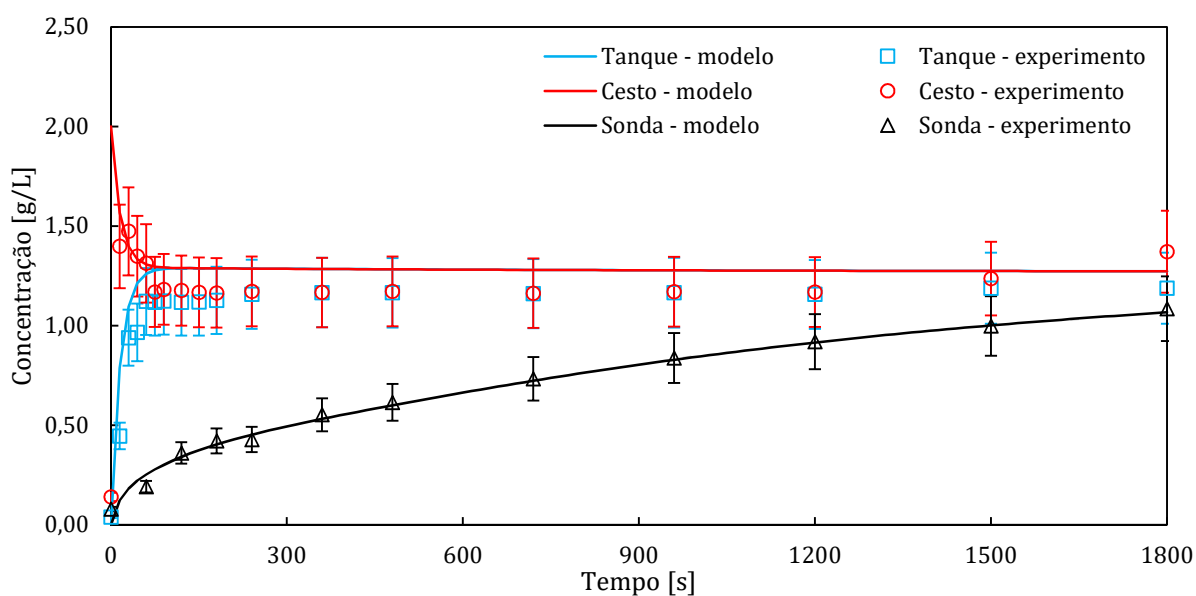


Figura 135 – Comparativo entre dados experimentais e numéricos: ensaio 16^{xlvi} do experimento fatorial.

^{xlv} Condição 15: inserção no tanque, agitação forte, volume de 90 litros, concentração de 1,25 g/L.

^{xlvi} Condição 16: inserção no cesto, agitação forte, volume de 90 litros, concentração de 1,25 g/L.

APÊNDICE IX – PARÂMETROS DE AJUSTE DO MODELO PARA CADA CONFIGURAÇÃO DO EXPERIMENTO FATORIAL

Nas discussões sobre a calibração do modelo computacional na seção 4.2, mencionou-se que para cada condição do experimento fatorial, foram ajustados parâmetros empíricos para se obter comportamentos semelhantes aos dados experimentais. A Tabela 8 apresenta um resumo dos valores ajustados para cada uma das configurações testadas durante o experimento fatorial.

Tabela 8 – Valores dos parâmetros empíricos para cada configuração testada.

Configuração	\dot{V}_{T-C}	\dot{V}_{C-N}	D_{sf}	\dot{V}_{T-VM}	X
1	1,50E-03	1,50E-07	1,50E-08	3,00E-05	0,75
2	5,00E-04	1,15E-07	6,50E-09		
3	1,50E-03	2,75E-07	1,50E-08	7,50E-05	0,50
4	1,00E-03	1,50E-07	7,50E-09		
5	7,00E-04	8,50E-08	4,50E-09	7,00E-06	0,50
6	4,00E-04	6,25E-08	7,50E-10		
7	2,50E-03	2,25E-07	7,50E-09	4,25E-05	0,65
8	1,25E-03	1,25E-07	3,75E-09		
9	1,75E-03	8,50E-08	1,00E-08	3,00E-05	0,70
10	5,00E-04	1,50E-07	8,50E-09		
11	2,00E-03	5,00E-07	5,00E-08	1,25E-04	0,70
12	1,25E-03	1,50E-07	6,25E-09		
13	8,25E-04	7,50E-08	1,00E-08	1,25E-05	0,65
14	5,50E-04	6,25E-08	8,50E-10		
15	1,75E-03	1,25E-07	5,00E-09	5,00E-05	0,60
16	1,25E-03	1,50E-07	2,00E-08		